Clonazione umana: un vaso di Pandora?

Ryszard Horowitz/Corbis

Ai suoi esordi, la fecondazione artificiale era considerata una minaccia per la stessa umanità. La clonazione ispira timori analoghi

di Robin Marantz Henig

Il 25 luglio una persona che un tempo era davvero speciale compirà 25 anni. Louise Brown, assistente in una scuola materna, appare come una giovane donna del tutto normale, una biondina tranquilla e un po' timida che di tanto in tanto si diverte a giocare a freccette nel pub locale. Ma la sua nascita fu accolta da titoli in prima pagina che la definivano «la bambina del secolo». Louise era la prima neonata concepita tramite fecondazione artificiale. Oggi qualcuno ricorderà il suo nome, o quello dei medici che effettuarono l'intervento - Steptoe ed Edwards - o il fatto che l'evento si svolse in Inghilterra. Ma il quarto di secolo trascorso ha offuscato il ricordo di uno dei più importanti aspetti della nascita di Louise: molti ne furono inorriditi. Anche alcuni scienziati temettero che Patrick Steptoe e Robert Edwards avessero fatto qualcosa di temerario. La nascitura sarebbe stata normale o le manipolazioni di laboratorio le avrebbero lasciato orribili difetti genetici? Quali sarebbero stati i risvolti psicologici della consapevolezza della sua nascita anomala? E sarebbe stata la prima di una genia di esseri innaturali che avrebbero potuto essere creati specificamente, magari per fini terribili? Ora che la fecondazione artificiale ha permesso la nascita di circa un milione di bambini in tutto il mondo, simili timori e speculazioni possono sembrare infondati, e persino assurdi. Ma le stesse obiezioni che allora venivano sollevate riguardo alla fecondazione artificiale vengono riproposte oggi, talvolta in forma identica, a proposito della clonazione umana. È possibile che quest'ultima, come è avvenuto per la fecondazione in vitro, finisca per trasformarsi, ai nostri occhi, da pratica mostruosa a tecnica comune? E se la clonazione umana e altre forme di intervento genetico sull'embrione diverranno comuni, dovremo temerle o accettarle? Le lezioni fornite dall'esperienza della fecondazione in vitro potranno agevolare le decisioni da prendere.

Pascal Goetgheluck Science Photo Library (a sinistra); Ray Foli Corbis-Bettmann (a destra)

UN MICROAGO INIETTA IL DNA CONTENUTO IN UNO SPERMATOZOO direttamente in una cellula uovo umana, effettuando così una fecondazione in vitro. Il primo essere umano nato con tecniche di fecondazione artificiale, Louise Brown, aveva 14 mesi quando comparve in un programma televisivo. In quell'occasione Pierre Soupart (nella foto con Louise), ricercatore della Vanderbilt University, dichiarò che «quando Louise avrà 15 anni, ci saranno così tanti bambini come lei che nessuno ci farà più caso».

Ieri e oggi

Quando la fecondazione artificiale, da possibilità ipotetica, divenne un fatto reale, alcuni la considerarono niente più che una forma di esibizionismo scientifico: «Lo sviluppo di bambini in provetta - notò un oppositore - può essere paragonato alla messa a punto di trapianti alari per consentire ai porci di volare». Ma altri ritennero la fecondazione artificiale un pericoloso insulto alla natura. La rivista inglese «Nova» pubblicò nella primavera del 1972 un servizio nel quale si affermava che i bambini in provetta erano «la peggiore minaccia dopo la bomba atomica» e si chiedeva che l'opinione pubblica bloccasse gli studiosi coinvolti. «Se oggi non accettiamo la responsabilità di dirigere i biologi - continuava l'articolo - domani pagheremo un prezzo molto alto: la perdita della nostra libertà di scelta e, con essa, della nostra umanità. Non ci resta molto tempo.»

Uno dei più accaniti fra i primi nemici della fecondazione artificiale fu Leon Kass, un biologo dell'Università di Chicago che si interessava professionalmente del nuovissimo campo della bioetica. Se la società avesse permesso a simili esperimenti di proseguire - scrisse poco dopo la nascita di Louise Brown - sarebbero stati in pericolo valori fondamentali: «l'idea dell'umanità della nostra vita e il significato del nostro venire al mondo, del nostro essere generati da un atto sessuale e quindi del nostro rapporto con progenitori e discendenti».

Kass è tuttora un detrattore di ogni nuova forma di tecnologia riproduttiva. «La clonazione minaccia la dignità della procreazione umana, dando a una generazione un controllo genetico senza precedenti sulla successiva» ha scritto nel 2003 sul «New York Times». «È il primo passo verso un mondo eugenetico nel quale i bambini diventano oggetti di manipolazione e prodotti della volontà.» I commenti di Kass sono particolarmente degni di nota in quanto egli non è un opinionista qualsiasi: da due anni è a capo del Consiglio per la bioetica istituito dal presidente George W. Bush, l'organo a cui è stato attribuito, come primo compito, quello di fornire la consulenza sulla regolamentazione della clonazione umana.

IN SINTESI

- Molte argomentazioni avanzate in passato contro la fecondazione in vitro, relative a pericoli per la stessa natura umana, vengono ripetute oggi, quasi identiche, a proposito della clonazione.
- Negli Stati Uniti l'opposizione alla fecondazione artificiale è riuscita a bloccare i finanziamenti governativi alla ricerca; tuttavia questa situazione ha ironicamente permesso alle attività private di svilupparsi senza controllo.
- Anche a causa della mancanza di supervisione scientifica, solo di recente si è potuto stabilire che le pratiche di fecondazione artificiale sono associate a un maggior rischio di difetti congeniti e di basso peso alla nascita.

Oggi possiamo constatare che la fecondazione artificiale non ha affatto prodotto legioni di bambini subumani né tantomeno ha portato alla disintegrazione della famiglia nucleare, conseguenze temute dai primi detrattori. E nell'ultimo decennio sono stati introdotti metodi di riproduzione assistita così nuovi e sofisticati che la tecnica di base usata per generare Louise Brown oggi sembra davvero di routine. Una delle previsioni avanzate allora, tuttavia, si è rivelata veritiera. Negli anni settanta gli oppositori ammonirono che la fecondazione in vitro ci avrebbe fatto precipitare su una china scivolosa verso forme di tecnologia riproduttiva sempre più complesse e per alcuni riprovevoli, e che una volta iniziato il processo non avrebbe più potuto essere fermato.

Se si considerano tutte le tecniche che fra breve tempo potrebbero essere disponibili per manipolare un embrione in fase di sviluppo, sembra che gli avversari della fecondazione in vitro non avessero tutti i torti al riguardo. Dopo tutto, nessuno degli interventi genetici che oggi vengono discussi - dalla diagnosi prenatale e dal trapianto di geni in cellule sessuali o in embrioni a fini terapeutici fino alla creazione di nuove linee di cellule staminali embrionali e, opzione particolarmente scomoda, alla clonazione - sarebbe nemmeno lontanamente ipotizzabile se gli scienziati non avessero imparato a fecondare le cellule uovo umane in laboratorio.

Ma l'esistenza di questa china scivolosa significa davvero che le attuali ricerche sulle tecnologie riproduttive condurranno inevitabilmente a sviluppi deplorevoli quali la generazione di embrioni come banche di organi, la produzione di ibridi fra uomo e animale o la clonazione umana? Chiaramente sono in molti a pensarlo, e ciò spiega perché oggi il Governo statunitense cerchi di limitare la possibilità di manipolare gli embrioni ancora prima che essa diventi realmente fattibile. Ma questa opposizione solleva il problema se le ricerche scientifiche che hanno profonde implicazioni etiche debbano semplicemente essere proibite. Oppure dovrebbero procedere, con la debita attenzione verso l'evoluzione di taluni settori della ricerca, in modo che la società possa prendere una decisione informata sull'eventuale necessità di una regolamentazione?

William Plowman/Getty

MEMBRI DELLA CHRISTIAN DEFENSE COALITION e del National Clergy Council manifestano contro gli esperimenti di clonazione umana della Advanced Cell Technologies di fronte alla sede della società, a Worcester (Massachusetts) il 30 novembre 2001.

L'AUTORE

ROBIN MARANTZ HENIG, autrice di diversi libri, collabora con le riviste «New York Times Magazine», «Civilization» e «Discover». Il suo prossimo libro, *Pandora's Baby*, rievoca gli albori delle ricerche sulla fecondazione in vitro.

Senza regole

Il forte interesse nel regolamentare o nel vietare del tutto la clonazione nasce in parte, negli Stati Uniti, dalla deliberata volontà di non permettere che si ripeta ciò che è accaduto con la fecondazione artificiale, un settore in cui si è assistito a un fiorire di attività senza alcuna forma di controllo federale o etico né di coordinamento scientifico. Ironicamente, il motivo per cui la fecondazione artificiale si è trovata in una situazione simile negli Stati Uniti è da rintracciare nel fatto che gli oppositori, e in particolare gli attivisti antiabortisti, hanno tentato di bloccarla completamente. L'obiezione principale degli antiabortisti era che i procedimenti di fecondazione in vitro richiedevano la generazione di embrioni in eccesso che alla fine sarebbero stati distrutti senza riguardo: un genocidio peggiore, ai loro occhi, di ciò che veniva perpetrato nelle cliniche degli aborti. Pertanto, essi ritennero che la strategia migliore fosse quella di impedire al Governo federale di finanziare le ricerche sulla fecondazione artificiale.

A partire dal 1973, una serie di Commissioni presidenziali ha discusso gli aspetti etici della fecondazione assistita, ma senza arrivare a conclusioni chiare. Alcune di esse si impantanarono nelle polemiche sull'aborto; altre conclusero che le ricerche sulla fecondazione artificiale erano eticamente accettabili purché gli scienziati rispettassero la condizione dell'embrione come «essere umano potenziale»: una posizione di principio, più che una guida pratica. Nel 1974 il Governo proibì il finanziamento federale delle ricerche sul feto, norma estesa anche a quelle sull'embrione umano (definito come un feto di meno di otto settimane), compresa la fecondazione in vitro. Nel 1993 il presidente Bill Clinton firmò il NIH Revitalization Act, che permetteva il finanziamento delle ricerche sulla riproduzione assistita; ma nel 1996 il Congresso bandì nuovamente la sperimentazione sugli embrioni. In definitiva, nonostante una serie di raccomandazioni delle commissioni di bioetica, secondo cui il sostegno statale alle ricerche sulla fecondazione artificiale può essere accettabile a certe condizioni, il Governo statunitense non ha mai sostenuto un solo progetto di ricerca in tal senso.

La mancanza di un intervento federale ha portato a un vuoto del quale hanno prontamente approfittato scienziati-imprenditori spalleggiati dal capitale privato. Costoro essenzialmente hanno fatto ciò che volevano e ciò che era economicamente conveniente, trasformando il settore della riproduzione assistita in un mercato senza alcuna forma di controllo. La professione medica tentò di stabilire un'autoregolamentazione - nel 1986, per esempio, la American Fertility Society diffuse ai suoi membri linee-guida etiche e cliniche - ma solo occasionalmente i controlli su base volontaria si rivelarono efficaci. La qualità dei centri specializzati - nel 1990 erano più di 160 - rimase assai ineguale, e coloro che desideravano sottoporsi a fecondazione assistita avevano ben poche informazioni obiettive che li guidassero nella scelta.

Oggi, in quello che appare come un tentativo per evitare di ripetere gli stessi errori, il Governo federale è attivamente impegnato nel regolamentare la clonazione. All'annuncio, nel 1997, della nascita di Dolly, il primo mammifero clonato da una cellula di adulto, il presidente Clinton stabilì norme, ancora in vigore, per proibire attività analoghe sull'uomo. Il Congresso ha compiuto vari tentativi per rendere illegale la clonazione umana, l'ultimo dei quali è una proposta di Legge che renderebbe ogni forma di questa pratica punibile con un'ammenda di un milione di dollari e fino a 10 anni di detenzione. (La Camera dei rappresentanti ha approvato la proposta lo scorso inverno, ma il Senato non l'ha ancora esaminata.) I politici hanno quindi messo sullo stesso piano due tipi di clonazione che gli scienziati cercavano di mantenere distinti: la clonazione «terapeutica», o «di ricerca», destinata a produrre cellule staminali embrionali con la capacità di differenziarsi in tessuti umani specializzati per curare le malattie degenerative; e la clonazione «riproduttiva», intrapresa specificamente per produrre un essere umano clonato. Una seconda proposta di Legge ora all'esame del Senato tutelerebbe esplicitamente la clonazione di ricerca, pur dichiarando illegale quella riproduttiva.

I rischi della fecondazione in vitro

Una conseguenza della mancata regolamentazione delle pratiche di fecondazione artificiale è che sono occorsi quasi 25 anni per riconoscere che i bambini nati dalla provetta sono effettivamente sog-

C'È CLONE E CLONE

C'è poco da fare, basta dire «clonazione» ed è subito brivido. La riprova è data dalla frequenza (e dai buoni risultati di *audience*) con cui ripassa in televisione una vecchia pellicola con Gregory Peck e Laurence Olivier, *I ragazzi venuti dal Brasile*, in cui si immagina che un dottor Mengele riparato in Sudamerica cloni nascostamente innumerevoli copie di Hitler per conquistare il mondo.

Ovviamente nessuno vuol mettere in discussione la libertà artistica di sceneggiatori di film e autori di racconti, tanto più quando il tema si presta ad affascinanti, o inquietanti, suggestioni. Suggestioni che servono a far pensare, ma per non perdersi in esse bisogna sempre tener d'occhio anche la realtà. E purtroppo quando si parla di clonazione sembra spesso difficile tenere distinti paure immaginarie e dati reali.

«In Italia, in questo campo abbiamo due solidi riferimenti di carattere internazionale. Uno riguarda il protocollo aggiuntivo della Convenzione di biomedicina del 1998, firmata anche dall'Italia, che stabilisce il divieto di clonazione riproduttiva umana, dove per clonazione riproduttiva umana s'intende la nascita di un individuo identico a un altro individuo, vivo o morto. C'è poi la Carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea, che adesso dovrebbe entrare a far parte del nuovo trattato costituzionale dell'Europa. Anch'essa all'articolo 3 (Diritto all'integrità della persona) enuncia un divieto di clonazione riproduttiva umana.» A fare questa rassicurante puntualizzazione è Stefano Rodotà che, oltre a essere il Garante della *privacy*, è membro della Commissione dell'Unione Europea per l'etica delle biotecnologie.

A spazzar via le possibili residue inquietudini di chi fantastica un mondo popolato di cloni aggiunge: «In questo momento non esiste alcuna legislazione al mondo, nessun paese che esplicitamente o implicitamente accetti la clonazione riproduttiva umana. Certo, ci sono state discussioni dopo alcuni annunci, molto dubbi, da parte dei Raeliani di aver già prodotto un clone umano. In quell'occasione c'è stato chi ha espresso il timore che alcuni paesi, come la Cina o la Libia, avrebbero potuto favorire questo tipo di operazioni. In realtà non ci sono elementi concreti per dire che alcuni paesi la ammettano o siano disposti ad ammetterla. In ogni caso, nazioni come Germania e Francia si erano all'epoca fatte promotrici di un'iniziativa in sede di Nazioni Unite che probabilmente sarà ripresa, sulla base di una considerazione plausibile: se ci sono dei vuoti nella legislazione internazionale, in questi vuoti si possono infilare coloro i quali possono avere interesse alla clonazione riproduttiva umana. In altri termini, come oggi ci sono i paradisi fiscali, domani potrebbero esserci "paradisi genetici", paesi che consentono attività vietate in tutte le altre nazioni».

La situazione sembrerebbe dunque evolvere verso un divieto generalizzato delle Nazioni Unite, anche se alcuni paesi sono orientati a preferire una moratoria, per il semplice fatto che al momento non possiamo dire quali potrebbero essere gli sviluppi della ricerca in questo campo.

Fugati i fantasmi della fantabiologia, Rodotà tiene però a sottolineare alcune importanti distinzioni, e in particolare che, almeno per il momento, il divieto riguarda unicamente la clonazione riproduttiva e non le altre forme di clonazione, ossia usi ulteriori di quella tecnica. «Il mio timore è proprio quello che queste paure vengano usate per interdire una cosa radicalmente diversa, la clonazione terapeutica. Si tratta di due concetti differenti, che nei documenti comunitari sono stati tenuti ben distinti. Quando è stato introdotto il divieto nella Carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea si è detto esplicitamente che questo non avrebbe riguardato le altre forme di clonazione, quelle intorno alle quali c'è oggi la maggiore discussione. Il termine clonazione è infatti più o meno propriamente adoperato anche in rapporto alla ricerca sulle cellule staminali tratte da embrioni umani. E dico propriamente o impropriamente perché questi embrioni possono essere riprodotti anche non per via di clonazione. Una possibilità ben nota a tutti è per esempio quella di usare gli embrioni sovrannumerari, che si trovano in moltissimi paesi, Italia compresa, legati alle tecniche di riproduzione assistita. A partire dalle cellule staminali si adottano poi tecniche di clonazione per svolgere ricerche su un'ampia gamma di malattie genetiche e degenerative.»

E conclude: «Su questo si innesca una discussione molto aspra che però ha di mira non tanto, o non solo, la clonazione in quanto tecnica, ma l'uso delle cellule staminali embrionali. La "Commissione Dulbecco" voluta da Umberto Veronesi aveva mostrato una certa apertura nei confronti di questa tecnica, ma purtroppo l'attuale Ministro della salute Girolamo Sirchia ha espresso un'opinione contraria».

In Italia ,come negli Stati Uniti, sembra che stia soffiando a livello governativo un vento poco propizio a questo tipo di ricerche.

GIANBRUNO GUERRERIO

Rick Gayle/Corbis/Contrasto

UN POPOLO DI CLONI PRIVATI DI IDENTITÀ: è una delle immagini che fanno più presa sulla fantasia di noi tutti. Nella realtà, le ricerche sulla clonazione non mirano alla riproduzione di persone, ma riguardano le cellule staminali, potenziale strumento per curare patologie degenerative, genetiche o di origine traumatica. Sotto, Christopher Reeve a un convegno sulle staminali.

Stew Milne/AP Photo

I DOCUMENTI

La Carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea, consultabile all'indirizzo web http://www.europarl.eu.int/charter/pdf/text_it.pdf è integrata da un documento di interpretazione, anch'esso facilmente reperibile in Rete: http://www.europarl.eu.int/charter/pdf/04473_it.pdf
Il Protocollo addizionale del 12 gennaio 1998, n. 168, relativo alla «Convenzione del Consiglio d'Europa per la protezione dei diritti dell'uomo e della dignità dell'essere umano riguardo all'applicazione della biologia e della medicina», firmato a Oviedo il 4 aprile 1997 può essere trovato alla pagina: http://www.ofj.admin.ch/themen/bioeth/zusatzprotokoll-klonen-i.pdf
mentre il documento di ratifica da parte dell'Italia lo si trova al sito: http://www.privacy.it/legge2001145.html
Il testo della relazione della Commissione di studio sull'utilizzo di cellule staminali per finalità terapeutiche, istituita dal Ministro della sanità Umberto Veronesi nel settembre 2000 (meglio nota come «Commissione Dulbecco») è reperibile all'indirizzo: http://www.ministerosalute.it/bacheca/paBachecaDettaglio.jsp?id=10

DALLO SCANDALO ALL'APPROVAZIONE

La storia di Doris Del-Zio dimostra quanto sia cambiato l'atteggiamento della società americana nei confronti della fecondazione artificiale nel corso degli anni settanta. Dopo aver tentato invano per anni di avere un figlio, la Del-Zio e il marito si rivolsero a Landrum Shettles, presso quello che oggi è il Columbia Presbyterian Medical Center. Nell'autunno del 1973 Shettles si preparò a effettuare una frettolosa procedura di fecondazione artificiale sulla coppia. L'intervento fu bruscamente interrotto dal superiore di Shettles, Raymond Vande Wiele, indignato per l'audacia del suo sottoposto e tutt'altro che convinto dell'accettabilità etica della fecondazione artificiale. Vande Wiele confiscò e congelò il contenitore dove si trovavano le cellule uovo e gli spermatozoi della coppia. Dal punto di vista dei Del-Zio, aveva commesso un omicidio: essi lo denunciarono e chiesero a lui e ai suoi superiori un risarcimento di 1,5 milioni di dollari.

Per coincidenza, la causa fu finalmente discussa in tribunale nel luglio 1978, lo stesso mese in cui nacque Louise Brown. La nascita della prima «figlia della provetta» fece considerare sotto una luce diversa i tentativi di Shettles: molte persone - fra cui i due uomini e le quattro donne della giuria - sembravano molto più inclini a ritenere la fecondazione artificiale un miracolo della medicina anziché una minaccia alla società civile.

Il processo durò sei settimane, e ciascuna delle due parti espresse il proprio punto di vista sull'opportunità, la sicurezza e l'accettabilità della fecondazione artificiale. Alla fine, Vande Wiele fu ritenuto colpevole di «comportamento arbitrario e lesivo» e condannato a versare un risarcimento di 50.000 dollari.

Dopo il processo, la fecondazione artificiale si diffuse rapidamente e nei cinque anni successivi permise la nascita di oltre 200 bambini, compresa Natalie, la sorella di Louise Brown. (Natalie ha oggi un bambino concepito naturalmente, ed è stata la prima donna nata dalla provetta a divenire madre.) Il fatto che questa tecnologia producesse tanti bambini sani in tutto il mondo cambiò l'opinione di Vande Wiele, in parallelo con il modificarsi dell'atteggiamento della società nel suo complesso verso la fecondazione artificiale. Quando la Columbia University fondò a New York, nel 1983, il primo centro specializzato per la fecondazione in vitro, il suo condirettore era Raymond Vande Wiele.

AP Photo

Doris Del-Zio e il suo avvocato, Michael Dennis, escono dalla Corte distrettuale di New York il 17 luglio 1978 dopo un'udienza. La Del-Zio e il marito John avevano denunciato il medico Raymond Vande Wiele per aver vanificato il loro tentativo di avere un figlio con la fecondazione in vitro.

getti a rischi. Per gran parte degli anni ottanta e novanta, si è ritenuto che la fecondazione in vitro non avesse alcun effetto sull'esito delle nascite, con l'eccezione dei problemi associati ai parti gemellari: un terzo di tutte le gravidanze artificiali ha portato alla nascita di due o tre bambini, come conseguenza non voluta della diffusa pratica di impiantare 6, 8 o persino 10 embrioni durante ogni ciclo di trattamento, nella speranza che per almeno uno di essi riuscisse l'annidamento in utero. (Questo metodo ha dato origine anche in Italia ad alcuni casi famosi di parti plurigemellari.) Quando alcuni studi sollevarono dubbi sulla sicurezza della fecondazione in vitro - rilevando un'incidenza doppia di aborti spontanei, tripla di morte prima della nascita o neonatale e quintupla di gravidanza ectopica - molti attribuirono questi problemi non al metodo di fecondazione in sé, ma all'associazione con gravidanze multiple.

Lo scorso anno, tuttavia, il lato oscuro della fecondazione in vitro è diventato innegabile. Lo scorso anno il «New England Journal of Medicine» (vol. 346, n. 10, 7 marzo 2002) ha pubblicato due studi che tenevano conto della maggiore incidenza di nascite gemellari nei casi di fecondazione artificiale e che continuavano a evidenziare problemi clinici. Uno studio ha confrontato il peso alla nascita di oltre 42.000 bambini concepiti mediante tecniche di riproduzione assistita negli Stati Uniti nel 1996 e 1997 con quello di oltre tre milioni di bambini concepiti naturalmente. Escludendo i casi di nascite premature e gemellari, i «figli della provetta» avevano una probabilità due volte e mezza più elevata rispetto ai controlli di mostrare un peso alla nascita inferiore a 2500 grammi.

L'altro studio ha esaminato oltre 5000 bambini nati in Australia fra il 1993 e il 1997, il 22 per cento dei quali era stato generato tramite fecondazione in vitro. Si è visto che questi ultimi avevano una probabilità doppia - rispetto ai bambini concepiti naturalmente - di presentare molteplici difetti congeniti, in particolare anomalie cromosomiche e muscolo-scheletriche. I ricercatori australiani hanno ipotizzato che queste differenze possano essere dovute ai farmaci impiegati per indurre l'ovulazione o per sostenere la gravidanza nelle prime fasi. Inoltre anche i fattori che determinano l'infertilità potrebbero aumentare il rischio di difetti congeniti. La stessa tecnica di fecondazione in vitro potrebbe non essere esente da colpe. In uno dei procedimenti comunemente utilizzati si inietta uno spermatozoo in una cellula uovo; può quindi accadere che lo spermatozoo fecondante sia anomalo, mentre in una situazione naturale la stessa cellula non avrebbe l'opportunità di generare un bambino con un difetto dello sviluppo.

Chiaramente, questi rischi hanno potuto rimanere nascosti in oltre 20 anni di esperienze con la fecondazione artificiale perché non è mai stato messo a punto un sistema per valutarne gli esiti. «Se il Governo avesse sostenuto la fecondazione artificiale, il settore avrebbe compiuto progressi molto più rapidi» afferma Duane Alexander, direttore del National Institute of Child Health and Human Development. «Il fatto è che questo istituto non ha mai finanziato alcuna forma di ricerca in tal senso.» Una circostanza che Alexander definisce incredibile e imbarazzante.

Adrian Arbib/Corbis

Louise Brown, in compagnia dei genitori, il giorno successivo al suo ventesimo compleanno. La sorella di Louise, Natalie Brown, anch'essa nata per fecondazione in vitro, ha avuto nel 1999 una bambina, concepita in modo naturale.

Sebbene stiano finalmente venendo in luce alcuni problemi clinici legati alla fecondazione artificiale, molte delle fosche previsioni che erano state agitate al riguardo sono destinate a non avverarsi. Per esempio, si temeva il dilagare del fenomeno degli «uteri in affitto»: donne oppresse di bassa condizione sociale pagate per far nascere i figli dei ricconi sterili. Ma si è visto che la maternità surrogata comporta costi materiali e psicologici elevati per tutte le parti in causa, e la pratica non si è mai diffusa.

Anche la clonazione umana potrebbe rivelarsi meno sinistra di quanto immaginiamo attualmente. La clonazione riproduttiva potrebbe finire per essere economicamente perdente, oppure i progressi scientifici potrebbero renderla inutile. Per esempio, a pensare a questa soluzione per avere figli potrebbero essere coloro che non producono cellule uovo o spermatozoi fertili; ma le tecniche di clonazione potrebbero consentire di creare cellule uovo o spermatozoi artificiali contenenti il DNA dell'individuo, che potrebbero poi essere uniti con, rispettivamente, spermatozoi o cellule uovo del partner. In futuro, il termine «clonazione» potrebbe indicare solo quella che oggi è chiamata clonazione terapeutica, e potrebbe effettivamente diventare una tecnica di laboratorio per produrre cellule capaci, per esempio, di rigenerare organi danneggiati. Alcuni osservatori ritengono che l'uso più comune della tecnologia della clonazione non riguarderà le cellule umane, ma quelle di un animale da compagnia particolarmente amato.

La storia della fecondazione in vitro rivela i pericoli che si manifesteranno inevitabilmente se si eviterà di prendere una decisione. Ma, nonostante l'analogia nelle reazioni dell'opinione pubblica verso la clonazione e la fecondazione artificiale, le due tecnologie sono assai differenti da un punto di vista filosofico. Lo scopo della fecondazione in vitro è quello di consentire la riproduzione sessuale per produrre un essere umano geneticamente unico; solo il sito del concepimento cambia, ma poi gli eventi procedono come in una gravidanza naturale. La clonazione non ha nulla a che fare con la riproduzione sessuale, dato che il suo scopo è quello di imitare un essere già esistente, e non il processo generativo.

Forse la principale differenza fra le due tecniche sta nel punto su cui si concentrano le nostre paure. Negli anni settanta il timore più grande era che la fecondazione in vitro fallisse, conducendo a sofferenze, delusioni e forse alla nascita di bambini grottescamente anormali. Oggi la più grande paura riguardo alla clonazione umana è che possa riuscire.

BIBLIOGRAFIA

WATSON JAMES D., *Moving toward Clonal Man: Is This What We Want?* in «Atlantic Monthly», 227, n. 5, pp. 50-53, maggio 1971.

GAYLIN WILLARD, *The Frankenstein Myth Becomes a Reality: We Have the Awful Knowledge to Make Exact Copies of Human Beings*, in «New York Times Magazine», pp. 12-13, 41-46, 5 marzo 1972.

RORVIK DAVID, *The Embryo Sweepstakes*, in «New York Times Magazine», pp. 17, 50-62, 15 settembre 1974.

SILVER LEE M., *Remaking Eden: How Genetic Engineering and Cloning Will Transform the American Family*, Avon Books, 1998.

ANDREWS LORI B., *The Clone Age: Adventures in the New World of Reproductive Technology*, Henry Holt and Company, 1999.

WEISS RICK, *Free to Be Me: Would-Be Cloners Pushing the Debate*, in «Washington Post», pag. A1, 12 maggio 2002.

La fisica, oltre il modello standard

di Gordon Kane

La teoria fondamentale della fisica delle particelle si trova in un momento cruciale della sua storia: è all'apice del suo successo e nello stesso tempo in procinto di essere superata

UNA NUOVA ERA DELLA FISICA DELLE PARTICELLE potrebbe presto essere inaugurata dall'osservazione di particelle supersimmetriche grazie al Tevatron del Fermi National Accelerator Laboratory di Batavia, nell'Illinois. Un quark e un antiquark che collidono frontalmente (*in rosso* e *in blu*) dovrebbero formare due particelle supersimmetriche pesanti (*in violetto chiaro*). Queste dovrebbero decadere in particelle *W* e *Z* (*in arancione*) e in due particelle supersimmetriche più leggere (*in violetto scuro*). Le particelle *W* e *Z* a loro volta decadrebbero in un elettrone, un antielettrone e un muone (*tutti in verde*), che sarebbero rivelati, e in un antineutrino non rilevabile (*in grigio*).

Bryan Christie Design

Oggi, a distanza di secoli dall'inizio della ricerca dei costituenti fondamentali di tutta la complessità e la bellezza del mondo, abbiamo una risposta incredibilmente semplice: le particelle necessarie sono solo sei, ovvero l'elettrone, i quark «su» e «giù», il gluone, il fotone e il bosone di Higgs. Undici particelle aggiuntive sono sufficienti per descrivere tutti i fenomeni esoterici studiati dai fisici delle particelle (*si veda la finestra in queste due pagine*). Non è una sorta di rivisitazione della teoria dei quattro elementi - terra, aria, acqua e fuoco - nata nell'antica Grecia; si tratta invece di una conclusione implicita nella più sofisticata teoria matematica delle natura mai elaborata, il modello standard della fisica delle particelle. A dispetto della parola «modello», che appare un po' limitativa, si tratta in effetti di una teoria universale che identifica le particelle elementari e specifica come interagiscono tra di loro. Ogni evento del nostro mondo (con l'eccezione degli effetti della gravità) è il risultato di interazioni fra le particelle del modello standard, che si comportano secondo le regole e le equazioni da esso previste.

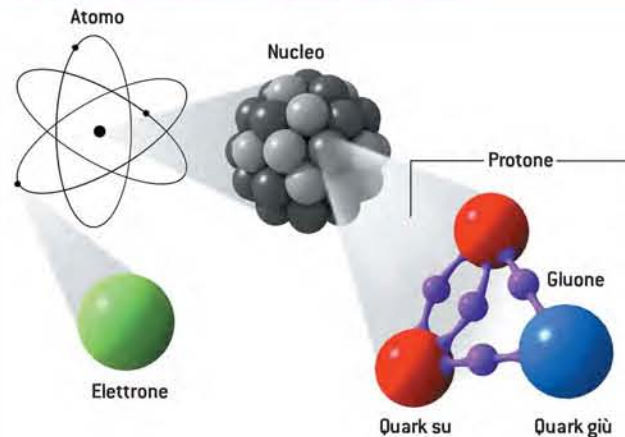
Il modello standard venne formulato negli anni settanta del secolo scorso e si è gradualmente imposto grazie a esperimenti svolti agli inizi degli anni ottanta. Quasi 30 anni di sperimentazione hanno verificato la teoria con un notevole livello di dettaglio, confermando tutte le sue previsioni. Da un certo punto di vista questo successo è gratificante, perché conferma che effettivamente comprendiamo, a un livello più profondo che mai, come funziona la natura. Paradossalmente, però, un simile successo è stato anche frustrante: prima dell'avvento del modello standard i fisici si erano abituati al fatto che gli esperimenti producessero particelle inattese o altri indizi che puntavano verso una nuova teoria, quasi prima che la precedente fosse stata completata. Da 30 anni si aspetta che una cosa del genere accada con il modello standard.

Ma l'attesa potrebbe finire presto. Esperimenti che permetteno di studiare collisioni a energie mai raggiunte o che studiano certi fenomeni chiave con maggiore precisione sono sul punto di superare il modello standard. Questi risultati non demoliranno la teoria, ma la estenderanno, scoprendo forze e particelle che essa non descrive. L'esperimento più importante è in corso presso il collisore Tevatron del Fermi National Accelerator Laboratory di Batavia (Illinois), che ha iniziato a raccogliere dati nel 2001. Il Tevatron potrebbe produrre direttamente sia le particelle che ancora mancano per completare il modello standard (i bosoni di Higgs), sia quelle previste dalla più convincente estensione della teoria (le cosiddette superpartner delle particelle note).

Informazioni significative iniziano anche a provenire dalle «fabbriche di quark *b*», ossia acceleratori di particelle attualmente in funzione in California e in Giappone che sono stati progettati per creare miliardi di esemplari del quark «bottom» (una delle 11 particelle addizionali) e degli antiquark corrispondenti. Queste particelle sono necessarie per lo studio di un fenomeno chiamato violazione CP. La simmetria CP (carica-parità) lega la materia e l'antimateria, e la sua violazione significa che l'antimateria non si comporta esattamente come una copia speculare della materia. L'entità della violazione CP osservata finora nei decadimenti di particelle è coerente con il modello standard, ma vi sono buoni motivi per prevedere una violazione molto più grande di quanto esso possa spiegare.

I fisici stanno anche studiando con precisione le proprietà elettriche e magnetiche delle particelle. Il modello standard prevede che elettroni e quark si comportino come microscopici magneti con una specifica intensità, e che il loro comportamento in un campo elettrico sia determinato solamente dalla loro carica elettrica. La maggior parte delle estensioni proposte del modello standard prevede però un'intensità magnetica e un comportamento elettrico leggermente diversi, e ora si sta ini-

Bryan Christie Design

IL MODELLO STANDARD

Le particelle

Sebbene il modello standard debba essere esteso, le sue particelle sono sufficienti a descrivere il mondo che ci circonda (esclusa la forza di gravità) e a spiegare quasi tutti i risultati sperimentali finora ottenuti dai fisici delle particelle.

LE PARTICELLE DELLA MATERIA (FERMIONI)

Nel modello standard le particelle fondamentali della materia ordinaria sono l'elettrone, il quark su (*u*) e il quark giù (*d*). Triplette di quark si legano fra loro per formare protoni (*uud*) e neutroni (*udd*), le particelle componenti dei nuclei atomici. Insieme con il neutrino elettronico, l'elettrone e i quark su e giù formano il primo di tre gruppi di particelle chiamati generazioni. Ogni generazione è identica in ogni aspetto, eccetto che per la massa delle particelle (*grafico a destra*). I valori riportati delle masse dei neutrini sono ipotetici, ma coerenti con le osservazioni.

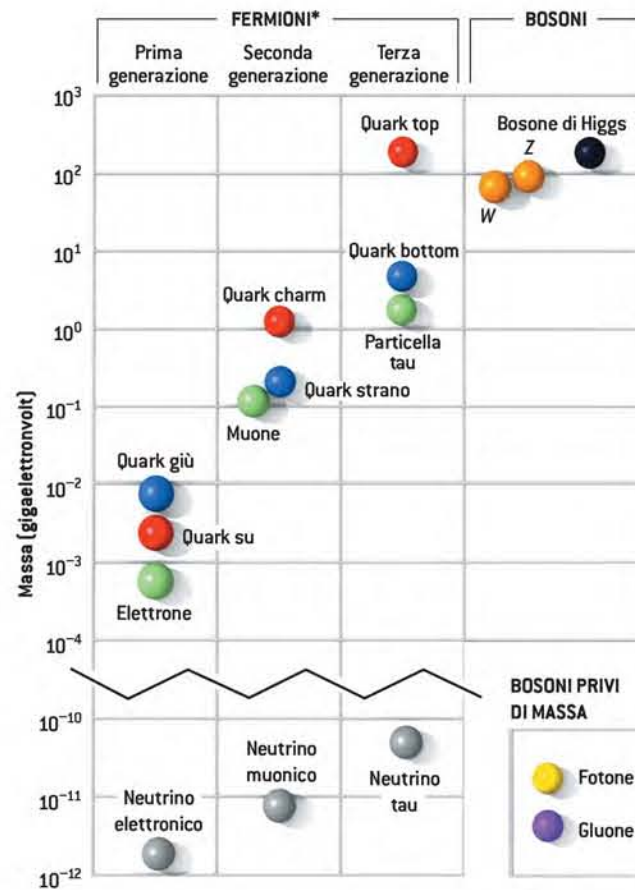
I MEDIATORI DELLE FORZE (BOSONI)

Il modello standard descrive tre delle quattro forze note: l'elettromagnetismo, l'interazione debole (coinvolta nella formazione degli elementi chimici) e l'interazione forte (che mantiene uniti protoni e neutroni nei nuclei atomici). Le forze sono mediate dallo scambio di specifiche particelle: i fotoni per l'elettromagnetismo, i bosoni *W* e *Z* per l'interazione debole e i gluoni per l'interazione forte. Per la gravità è stata postulata l'esistenza dei gravitoni, ma il modello standard non comprende questa forza. Il modello standard unifica parzialmente l'elettromagnetismo e l'interazione debole, che si miscelano in una forza «elettrodebole» ad alte energie o - cosa equivalente - a distanze inferiori al diametro dei protoni.
Uno dei più grandi successi del modello standard è che la forma delle forze - la struttura di dettaglio delle equazioni che le descrivono - è in buona parte determinata da princìpi generali contenuti nella teoria anziché essere scelta *ad hoc* per corrispondere a una serie di dati empirici. Nel caso dell'elettromagnetismo, per esempio, la validità della teoria quantistica relativistica dei campi (su cui si basa il modello standard) e l'esistenza dell'elettrone implicano che anche il fotone debba esistere e interagire nel modo che si osserva. Simili argomenti hanno permesso di prevedere l'esistenza e le proprietà, poi confermate, dei gluoni e delle particelle *W* e *Z*.

LA FONTE DELLA MASSA

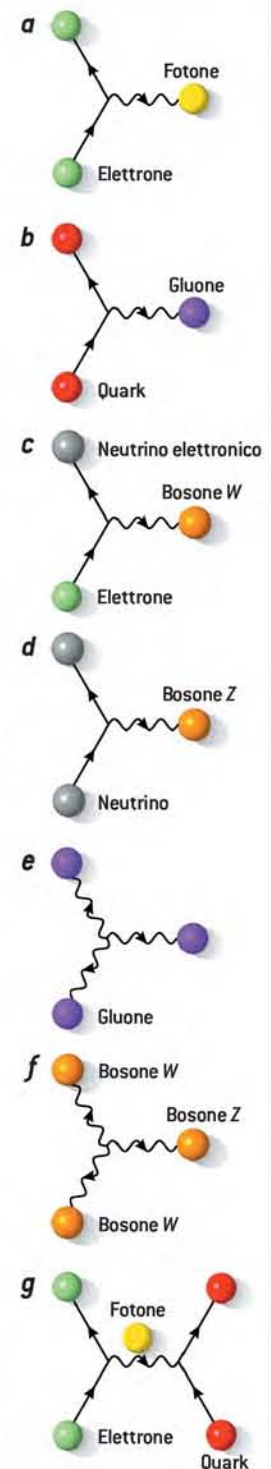
Oltre alle particelle già descritte, il modello standard prevede l'esistenza del bosone di Higgs, che non è stato ancora osservato sperimentalmente. Il bosone di Higgs interagisce con le altre particelle in un modo speciale che conferisce loro la massa.

LIVELLI PIÙ PROFONDI?

È possibile che il modello standard venga superato da una teoria in cui i quark e gli elettroni siano costituiti da particelle più fondamentali? Quasi certamente no. Gli esperimenti si sono spinti molto in profondità, senza trovare alcun indizio dell'esistenza di strutture ulteriori. Cosa più importante, il modello standard è una teoria coerente che ha senso se gli elettroni e i quark sono particelle fondamentali. Non ci sono questioni in sospeso che indichino una struttura sottostante più profonda. Inoltre, alle alte energie tutte le forze diventano simili, in particolare se vale la supersimmetria. Se però gli elettroni e i quark sono composti, l'unificazione fallisce e le forze non si approssimano. La teoria quantistica relativistica dei campi considera gli elettroni e i quark come puntiformi e privi di struttura. Nelle teorie al di là del modello standard le particelle potrebbero essere pensate come minuscole stringhe o membrane (come nella teoria delle stringhe), ma saranno sempre elettroni e quark, con tutte le ben note proprietà descritte dal modello standard per le basse energie.

I fermioni si suddividono in quark e leptoni; questi ultimi includono l'elettrone, il muone, la particella tau e i tre tipi di neutrini.

Le regole del gioco

Il modello standard descrive le particelle fondamentali e le loro interazioni. Per una piena comprensione della natura, abbiamo anche bisogno di sapere quali regole usare per calcolare i risultati delle interazioni. Un esempio che aiuta a chiarire questo punto è la legge di Newton, $F = ma$. F è una forza qualsiasi, m è la massa di una particella qualsiasi e a è l'accelerazione della particella indotta dalla forza. Anche conoscendo le particelle e le forze esercitate su di esse, non potete calcolare come esse si comporteranno se non conoscete la regola $F = ma$. La versione moderna delle regole è la teoria quantistica relativistica dei campi, elaborata nella prima metà del XX secolo. In seguito lo sviluppo del modello standard insegnò ai fisici la natura delle particelle e delle forze che seguivano le regole della teoria quantistica dei campi. Il modello standard estende anche il concetto classico di forza: oltre a respingersi o attirarsi, le particelle interagenti possono anche cambiare la propria identità ed essere create o distrutte.
I diagrammi di Feynman (*a destra*), ideati da Richard P. Feynman, sono un utile strumento per descrivere le interazioni nella teoria quantistica dei campi. Le linee rette rappresentano le traiettorie delle particelle della materia; le linee ondulate indicano quelle dei mediatori delle forze.
L'elettromagnetismo è prodotto dall'emissione o dall'assorbimento di fotoni da parte di una particella carica, come un elettrone o un quark. In *a*, l'elettrone in arrivo emette un fotone e si allontana in una nuova direzione.
L'interazione forte fa sì che un gluone venga emesso (*b*) o assorbito da un quark. L'interazione debole coinvolge le particelle *W* e *Z* (*c*, *d*), emesse o assorbite sia dai quark sia dai leptoni (elettroni, muoni, particelle tau e neutrini). Si noti come la particella *W* faccia sì che l'elettrone cambi identità.
I gluoni (*e*) e le particelle *W* e *Z* (*f*) - ma non i fotoni - interagiscono anche con se stessi.
I diagrammi da *a* a *f* sono chiamati vertici di interazione. Le forze sono prodotte dalla combinazione di due o più vertici. Per esempio, l'interazione forte tra un elettrone e un quark è in gran parte generata dal trasferimento di un fotone (*g*). Tutto ciò che accade nel nostro mondo, esclusi gli effetti della gravità, risulta dalla combinazione di questi vertici.

a: Fotone, Elettrone
b: Gluone, Quark
c: Neutrino elettronico, Bosone *W*, Elettrone
d: Bosone *Z*, Neutrino
e: Gluone
f: Bosone *W*, Bosone *Z*, Bosone *W*
g: Fotone, Elettrone, Quark

ziando a raccogliere dati con una sensibilità sufficiente per evidenziare i minuscoli effetti previsti.

Guardando al di là della Terra, i ricercatori che studiano i neutrini solari e i neutrini dei raggi cosmici - particelle elusive che quasi non interagiscono con la materia - hanno recentemente stabilito che essi possiedono una massa: un risultato a lungo atteso dai teorici che studiano le estensioni del modello standard (si veda l'articolo *Risolto il problema dei neutrini solari* di Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein e David L. Wark in «Le Scienze» n. 417, maggio 2003). La prossima serie di esperimenti chiarirà la forma della teoria necessaria a spiegare le masse osservate dei neutrini.

Ulteriori sperimentazioni sono in corso per individuare le misteriose particelle che costituiscono la materia oscura fredda e per verificare una volta per tutte se i protoni decadono. Il successo di ognuno di questi progetti sarebbe una pietra miliare della fisica del «dopo modello standard».

Il proseguimento di queste ricerche aprirà la via a una nuova era della fisica delle particelle, un'era che sarà caratterizzata dalla ricchezza di dati. Nel 2007 circa scenderà in campo il Large Hadron Collider (LHC), un acceleratore di 27 chilometri di circonferenza attualmente in costruzione al CERN presso Ginevra. In fase di progetto vi è anche un collisore lineare elettroni/positroni della lunghezza di 30 chilometri che funzionerà come complemento di LHC.

Benché si stiano scorgendo i primi indizi di una fisica al di là del modello standard, capita spesso di leggere, soprattutto a livello di divulgazione, che questa teoria è stata dimostrata erronea e deve essere abbandonata; ma in realtà le cose non stanno così. Prendiamo come esempio le equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo, enunciate alla fine del XIX secolo. All'inizio del XX secolo si è appreso che a dimensioni atomiche è necessaria una versione quantistica delle equazioni di Maxwell. Più tardi, il modello standard ha incorporato le equazioni di Maxwell quantistiche nel complesso delle sue equazioni. In nessun caso diciamo che le equazioni di Maxwell sono erronee: semplicemente, sono state estese (e vengono ancora usate nella loro forma originaria per progettare innumerevoli dispositivi elettronici).

Un edificio solido

Così pure, il modello standard è destinato a conservarsi. È una teoria matematica completa, un edificio estremamente stabile e interconnesso. Si scoprirà che è una parte di un edificio simile e più grande, ma non può essere «sbagliato». Nessuna parte di questa teoria può fallire senza che l'intera struttura crolli: se essa fosse davvero erronea, si dovrebbe ammettere che molti test sperimentali siano stati coronati da successo per puro caso. Senza dubbio il modello standard continuerà a essere utilizzato per descrivere le interazioni forte, debole ed elettromagnetica a basse energie.

Il modello è stato sottoposto a innumerevoli verifiche, che ne hanno immancabilmente confermato la validità, e ha correttamente previsto l'esistenza dei bosoni *W* e *Z*, dei gluoni e di due dei quark più pesanti («charm» e «top»). Tutte queste particelle sono state poi osservate e hanno mostrato esattamente le proprietà previste. Un secondo test importante riguarda l'angolo di mescolamento elettrodebole, un parametro importante nella descrizione delle interazioni deboli e magnetica. Nel modello standard esso deve assumere lo stesso valore per ogni processo elettrodebole, e gli esperimenti hanno già dimostrato che questo è vero, con una precisione intorno all'1 per cento.

In terzo luogo, il collisore LEP (Large Electron-Positron) del CERN, in funzione fra il 1989 e il 2000, ha osservato circa 20 milioni di bosoni *Z*. Essenzialmente ognuno di essi è decaduto nel modo atteso per il modello standard, che ha previsto con successo anche il numero di occorrenze di ogni tipo di decadimento, nonché energia e direzione delle particelle risultanti. Questi test sono solo alcuni di quelli che hanno saldamente confermato il modello standard.

IN SINTESI

- Il modello standard della fisica delle particelle è la migliore teoria della natura che sia mai stata formulata, ma appare sempre più evidente che debba essere esteso, aggiungendo nuove particelle che intervengono nelle reazioni di alta energia.
- Diversi grandi esperimenti sono in procinto di fornire una prova diretta dell'esistenza di queste particelle. Dopo 30 anni di consolidamento, la fisica delle particelle sta entrando in una nuova era di scoperte. Molti misteri finora insondabili potrebbero essere risolti dalla fisica del «dopo modello standard».
- Vi è anche una componente del modello standard - il bosone di Higgs - che non è ancora stata osservata; è possibile che possa essere rivelata nei prossimi anni dal Tevatron del Fermilab.

Nella sua completezza, il modello standard comprende 17 particelle e circa altrettanti parametri liberi (grandezze come la massa delle particelle e l'intensità delle interazioni). Queste grandezze possono, in linea di principio, assumere un valore qualsiasi: quello corretto può essere determinato solo tramite misurazioni. I critici da poltrona qualche volta paragonano i numerosi parametri del modello standard ai complessi sistemi di epicicli usati dai teorici medievali per descrivere le orbite planetarie. Essi immaginano che il modello standard abbia limitate capacità predittive, o che il suo contenuto sia arbitrario, o che possa spiegare qualsiasi cosa semplicemente aggiustando qualche parametro.

In realtà è vero il contrario: una volta che le masse e le intensità delle interazioni siano state misurate per un certo processo, esse sono fissate per tutta la teoria e per qualsiasi altro esperimento. Inoltre, le forme dettagliate di tutte le equazioni del modello standard sono determinate dalla teoria. Ogni parametro, eccetto la massa del bosone di Higgs, è stato misurato. Fino a quando non andremo oltre il modello standard, l'unica cosa che può cambiare con i nuovi risultati è la precisione della nostra conoscenza dei parametri; e, via via che questa aumenta, diventa più difficile - e non più facile - mantenere la coerenza di tutti i dati sperimentali, perché le grandezze misurate devono accordarsi a un più alto livello di precisione.

Si potrebbe pensare che l'aggiunta di ulteriori particelle e interazioni per estendere il modello standard introduca molta più libertà, ma questo non è necessariamente vero. L'estensione più accettata dalla comunità dei fisici teorici è il modello standard a supersimmetria minima (MSSM). La supersimmetria assegna un «superpartner» a ciascuna specie di particella. Sappiamo poco riguardo alle masse di questi superpartner, ma le loro interazioni sono regolate dalla supersimmetria. Una volta che le masse siano state misurate, le previsioni sperimentali dell'MSSM saranno ancora più fortemente vincolate di quelle del modello standard, a causa delle relazioni matematiche della supersimmetria.

Dieci misteri

Se il modello standard funziona così bene, perché dovrebbe essere esteso? Questa esigenza emerge soprattutto quando si considera il problema di unificare tutte le forze della natura. Nel modello standard, possiamo estrapolare le forze e chiederci come si comporterebbero a energie molto più alte. Per esempio: come si comportavano le forze alle temperature estremamente elevate che dovevano esserci nell'universo subito dopo il big bang? A basse energie, l'interazione forte è circa 30 volte più intensa di quella debole e circa 100 volte più intensa dell'elettromagnetismo. Quando estrapoliamo la teoria a energie molto più elevate, scopriamo che le intensità di queste tre forze diventano molto simili, ma non esattamente uguali. Se introduciamo la supersimmetria, allora le forze diventano pressoché identiche a una specifica energia (*si veda la finestra qui a fianco*). Per di più, la forza gravitazionale si approssima alla stessa intensità a un'energia leggermente più elevata, suggerendo una connessione fra le forze del modello standard e la gravità stessa. Questi risultati sembrano essere solidi indizi a favore dell'MSSM.

Altri motivi per estendere il modello standard sono forniti da fenomeni che esso non può spiegare o, in alcuni casi, neppure incorporare:

1. Tutte le attuali teorie sembrano implicare che l'universo debba contenere un'enorme concentrazione di energia, anche nelle regioni più vuote dello spazio. L'attrazione gravitazionale di questa cosiddetta «energia del vuoto» avrebbe dovuto incurvare velocemente l'universo già molto tempo fa, oppure farlo espandere fino a dimensioni molto maggiori di quelle osservate. Il modello standard non può aiutarci a risolvere questo enigma, chiamato problema della costante cosmologica.

2. A lungo si è ritenuto che l'espansione dell'universo stesse rallentando a causa dell'attrazione reciproca di tutta la materia in esso contenuta. Ora sappiamo che l'espansione sta accelerando e che la causa di questa accelerazione (chiamata «energia oscura», ma di natura del tutto ignota) non può far parte della fisica del modello standard.

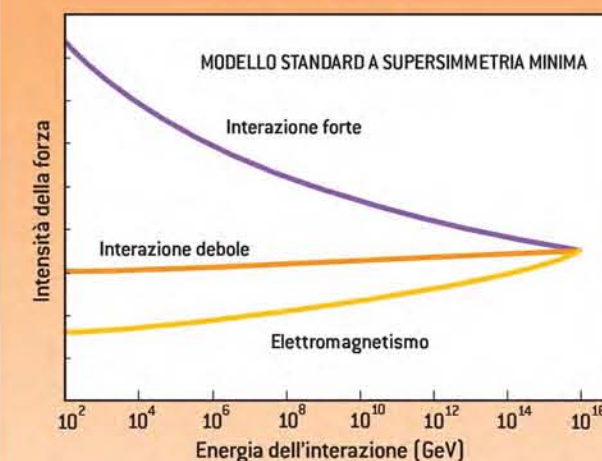
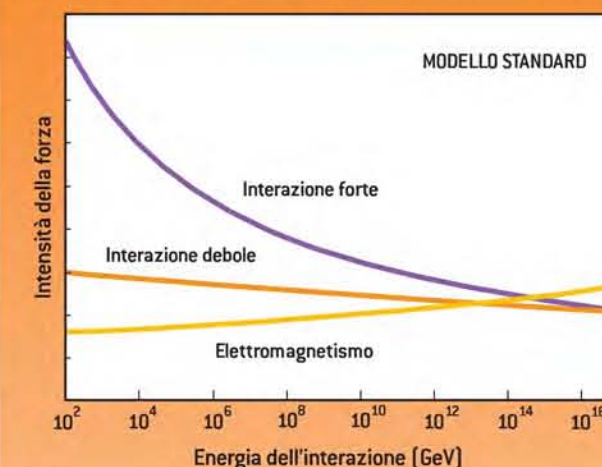
3. Ci sono solide prove che, nella prima frazione di secondo dopo il big bang, l'universo abbia attraversato una fase di espansione estremamente rapida, comunemente chiamata inflazione. I campi responsabili dell'inflazione non possono far parte del modello standard.

4. Se l'universo ebbe origine da un'enorme esplosione di energia, avrebbe dovuto contenere parti uguali di materia e antimateria (simmetria CP). Le stelle e le nebulose sono invece costituite da protoni, neutroni ed elettroni, e non dalle loro antiparticelle. Questa asimmetria della materia non può essere spiegata dal modello standard.

5. Circa un quarto dell'universo è costituito da materia oscura fredda, che non può essere composta da particelle contemplate nel modello standard.

6. Nel modello standard, le interazioni con il campo di Higgs (che è associato al bosone di Higgs) fanno sì che le particelle abbiano massa. Il modello standard non può spiegare la forma molto speciale che devono assumere le interazioni di Higgs.

7. Apparentemente, le correzioni quantistiche rendono enorme

Le prove della supersimmetria

Nina Finkel

La teoria più accettata per superare il modello standard è l'MSSM (modello standard a supersimmetria minima). In questo modello, ogni particella nota ha una superpartner che è correlata a essa mediante la supersimmetria. Le particelle si dividono in due ampie classi: i bosoni (come i mediatori delle forze), che possono ammassarsi in un singolo stato, e i fermioni (come i quark e i leptoni), che evitano di avere stati identici. Il superpartner di un fermione è sempre un bosone, e viceversa. Una prova indiretta della supersimmetria proviene dall'estrapolazione delle interazioni alle alte energie. Nel modello standard le tre forze diventano simili, ma non uguali, per intensità (*in alto*). L'esistenza delle particelle superpartner modifica le cose in modo che le forze vengono a coincidere tutte a una particolare energia (*in basso*): un indizio che esse diventano unificate se vale la supersimmetria.

L'AUTORE

GORDON KANE, un teorico delle particelle, è professore di fisica presso l'Università del Michigan ad Ann Arbor. Nel suo lavoro esplora i possibili modi per verificare ed estendere il modello standard della fisica delle particelle. In particolare studia il campo di Higgs e l'estensione supersimmetrica del modello, con particolare riguardo per le correlazioni fra teoria ed esperimenti e per le implicazioni della supersimmetria nella fisica delle particelle e in cosmologia.

la massa calcolata del bosone di Higgs, e questa a sua volta renderebbe enorme la massa di tutte le particelle. Questo risultato non può essere evitato nel modello standard e solleva un grave problema concettuale.

8. Il modello standard non può includere la gravità, perché questa non ha la stessa struttura delle altre tre forze.

9. I valori delle masse dei quark e dei leptoni (come l'elettrone e il neutrino) non possono essere spiegati dal modello standard.

10. Il modello standard ha tre «generazioni» di particelle. Il mondo che sperimentiamo tutti i giorni è costituito interamente da particelle della prima generazione, che sembra formare una teoria coerente per suo conto. Il modello standard descrive tutte e tre le generazioni, ma non può spiegare come mai non ne esista solo una.

Nell'enunciare questi misteri, quando dico che il modello standard *non può* spiegare un dato fenomeno, non intendo dire che non lo ha ancora spiegato, ma potrebbe farlo un giorno. Il modello standard è una teoria fortemente vincolata, e non potrà *mai* spiegare i fenomeni che abbiamo elencato. Ciò non significa che non esistano possibili spiegazioni. Uno dei motivi per cui l'estensione supersimmetrica del modello standard è attraente per molti fisici è che può spiegare tutti questi misteri, fatta eccezione per il secondo e gli ultimi tre. La teoria delle stringhe (nella quale le particelle sono rappresentate da minuscole entità monodimensionali anziché da oggetti puntiformi) descrive invece gli ultimi tre. I fenomeni che il modello standard non può spiegare rappresentano indizi su come esso debba essere esteso.

Non è sorprendente che ci siano domande a cui il modello standard non può rispondere: ogni teoria scientifica di successo ha aumentato il numero delle domande a cui è stata data risposta, ma ne ha lasciate alcune in sospeso. E anche se il progresso delle conoscenze ha portato a nuove domande che non potevano essere formulate prima, il numero di domande fondamentali ancora senza risposta ha continuato a diminuire.

Alcuni di questi 10 misteri indicano un altro motivo per cui la fisica delle particelle sta entrando in una nuova era. È diventato chiaro che molti dei più profondi problemi di cosmologia hanno la loro soluzione nella fisica delle particelle, sicché i due campi si sono fusi in una più vasta «cosmologia delle particelle». Solamente da studi cosmologici abbiamo potuto apprendere che l'universo è fatto di materia (e non di antimateria) o che un quarto dell'universo è costituito da materia oscura fredda. Qualsiasi interpretazione teorica di questi fenomeni deve spiegare come essi siano emersi nell'evoluzione dell'universo dopo il big bang. Ma la cosmologia da sola non ci può rivelare quali particelle costituiscano la materia oscura fredda, o come abbia avuto origine l'asimmetria della materia, o come si sia prodotta l'inflazione. La comprensione dei fenomeni alle scale più grandi e più piccole deve essere un processo unitario.

Il campo di Higgs

I teorici stanno già affrontando tutti questi misteri del dopo modello standard, ma rimane da completare anche un aspetto essenziale di questa teoria. Per generare la massa degli elettroni, dei quark e dei bosoni W e Z, essa si basa sul campo di Higgs, che non è ancora stato osservato.

Il campo di Higgs è fondamentalmente diverso da ogni altro. Per rendercene conto, consideriamo il campo elettromagnetico. Le cariche elettriche danno origine ai campi elettromagnetici che ci circondano (basta accendere una radio per verificarne la presenza). Questi campi trasportano energia; una regione dello spazio ha la sua energia minima quando il campo elettromagnetico in essa svanisce. Il campo nullo è lo stato naturale in assenza di particelle cariche; ma, sorprendentemente, il modello standard impone che al minimo di energia corrisponda un valore del campo di Higgs diverso da zero. Di conseguenza, l'universo è permeato da un campo di Higgs non nullo, e le particelle interagiscono continuamente con questo campo, muovendosi in esso come pesci nell'acqua. È proprio questa interazione che fornisce alle particelle massa e inerzia.

Al campo di Higgs è associato il bosone di Higgs. Nel modello standard non possiamo prevedere la massa di una particella qualsiasi a partire da principi primi, compresa la massa del bosone di Higgs stesso. Si possono, tuttavia, utilizzare altre grandezze misurate per calcolare alcune masse, come quelle dei bosoni W e Z e del quark top. Queste previsioni sono state confermate, offrendo supporto alla costruzione teorica del campo di Higgs.

I fisici sanno già qualcosa riguardo alla massa del bosone di Higgs. Gli sperimentatori del LEP hanno misurato circa 20 grandezze che sono in relazione fra di loro attraverso il modello standard. Tutti i parametri necessari per effettuare previsioni su queste grandezze sono già stati misurati, eccetto la massa del bosone di Higgs. Si può quindi partire da questi dati e chiedersi quale massa di Higgs dia la migliore corrispondenza per le 20 grandezze. Il risultato è che il bosone di Higgs deve avere una massa inferiore a 200 gigaelettronvolt (GeV). (La massa del protone è pari a circa 0,9 GeV e quella del quark top a 174 GeV.)

Il fatto che sia possibile effettuare questo calcolo è una buona prova a favore dell'esistenza del campo di Higgs. Se esso non esistesse e il modello standard fosse erroneo, sarebbe davvero una coincidenza incredibile che le 20 grandezze fossero in relazione tale da risultare coerenti con una specifica massa del bosone di Higgs. La nostra fiducia in questo modo di procedere è aumentata dal fatto che un approccio analogo permise di prevedere la massa del quark top prima che fosse osservato direttamente.

Il LEP ha condotto anche una ricerca diretta dei bosoni di Higgs, ma ha potuto arrivare solo fino a una massa di circa 115 GeV. Al limite superiore raggiungibile in questo esperimento un piccolo numero di eventi ha interessato particelle che si sono comportate come dovrebbe fare un bosone di Higgs, ma i dati raccolti non sono sufficienti a confermare la scoperta della particella. Nel complesso, tutti questi risultati indicano che la massa del bosone di Higgs debba essere compresa fra 115 e 200 GeV.

Il LEP è ora in via di smantellamento per far posto all'LHC, che dovrebbe iniziare a raccogliere dati fra quattro anni. Nel frattempo la ricerca del bosone di Higgs continua al Tevatron del Fermilab. Se questo acceleratore continuerà a funzionare secondo le aspettative e non verrà intralciato da problemi tecnici o di finanziamento, potrebbe confermare l'esistenza di un bosone di Higgs da 115 GeV entro due o tre anni. Se il bosone fosse più pesante, occorrerà più tempo prima che un segnale chiaro emerga dal fondo. Secondo le previsioni, il Tevatron dovrebbe produrre più di 10.000 bosoni di Higgs, e potrebbe quindi verificare se questa particella si comporta nel modo atteso. L'LHC sarà invece una vera e propria «fabbrica» di bosoni di Higgs, in grado di produrne milioni e di permetterne uno studio accurato.

Vi sono anche buone probabilità che alcune delle superpartner più leggere previste dall'MSSM abbiano masse abbastanza piccole da poter essere prodotte dal Tevatron. Ciò significa che una conferma diretta della supersimmetria potrebbe arrivare nei prossimi anni. La superpartner più leggera è la migliore candidata a costituire la materia oscura fredda: è possibile che il Tevatron possa rivelarla per la prima volta. L'LHC produrrà un grande numero di superpartner - se esistono - e permetterà di verificare una volta per tutte se la supersimmetria fa parte della natura.

Fermilab Photo

IL POTENZIAMENTO DEGLI ENORMI RIVELATORI DI PARTICELLE del Tevatron, realizzato dai fisici del Fermilab fra il 1996 e il 2000, ha reso questa macchina teoricamente in grado di osservare i bosoni di Higgs e di verificare la supersimmetria.

Teorie efficaci

Per capire appieno le relazioni fra il modello standard e il resto della fisica, la sua potenza e i suoi limiti, è utile pensare in termini di teorie efficaci. Una simile teoria è una descrizione di un aspetto della natura i cui parametri sono, in linea di principio, calcolabili usando una teoria più profonda. Per esempio, nella fisica nucleare si prendono la massa, la carica e lo spin del protone come parametri. Nel modello standard si possono calcolare queste grandezze usando le proprietà dei quark e dei gluoni. La fisica nucleare è una teoria efficace del protone, mentre il modello standard è la teoria efficace dei quark e dei gluoni.

Da questo punto di vista, ogni teoria efficace è aperta ed egualmente fondamentale; ovvero, non è affatto fondamentale. La scala continuerà indefinitamente? L'MSSM risolve svariati problemi che il modello standard non può affrontare, ma a sua volta prevede l'uso di parametri che potrebbero essere calcolabili nella teoria delle stringhe.

Può darsi però che la fisica delle particelle abbia comunque una posizione speciale, in quanto potrebbe aumentare la nostra comprensione della natura fino al punto in cui saremo in grado di formulare una teoria senza parametri. La teoria delle stringhe, o una delle sue parenti, potrebbe permettere di calcolare tutti i parametri: non solo la massa dell'elettrone e grandezze simili, ma anche l'esistenza dello spazio-tempo e le regole della teoria quantistica. Ma ci sono ancora una o due teorie efficaci fra noi e questo obiettivo.

BIBLIOGRAFIA

LEDERMAN LEON e SCHRAMM DAVID N., *Dai quark al cosmo*, Zanichelli, Bologna, 1991.

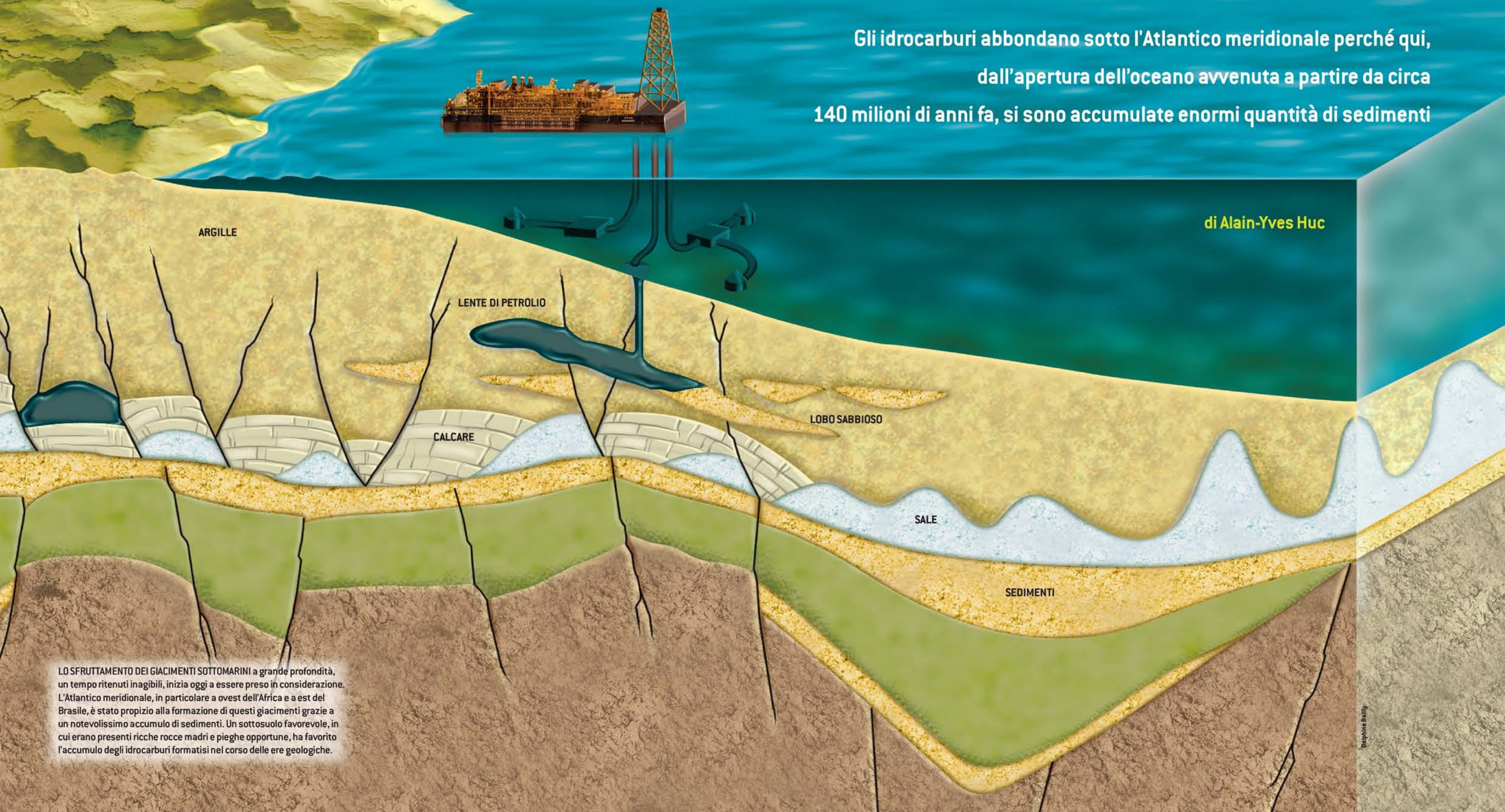
HODDESON LILLIAN, BROWN LAURIE M., RIORDAN MICHAEL e DRESDEN MAX (a cura), *The Rise of the Standard Model: A History of Particle Physics from 1964 to 1979*, Cambridge University Press, 1997.

KANE GORDON, *Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature*, Perseus Publishing, 2001.

Per un elenco di siti Web dedicati alla fisica delle particelle: particleadventure.org/particleadventure/other/othersites.html

Petrolio nelle profondità oceaniche

Gli idrocarburi abbondano sotto l'Atlantico meridionale perché qui, dall'apertura dell'oceano avvenuta a partire da circa 140 milioni di anni fa, si sono accumulate enormi quantità di sedimenti

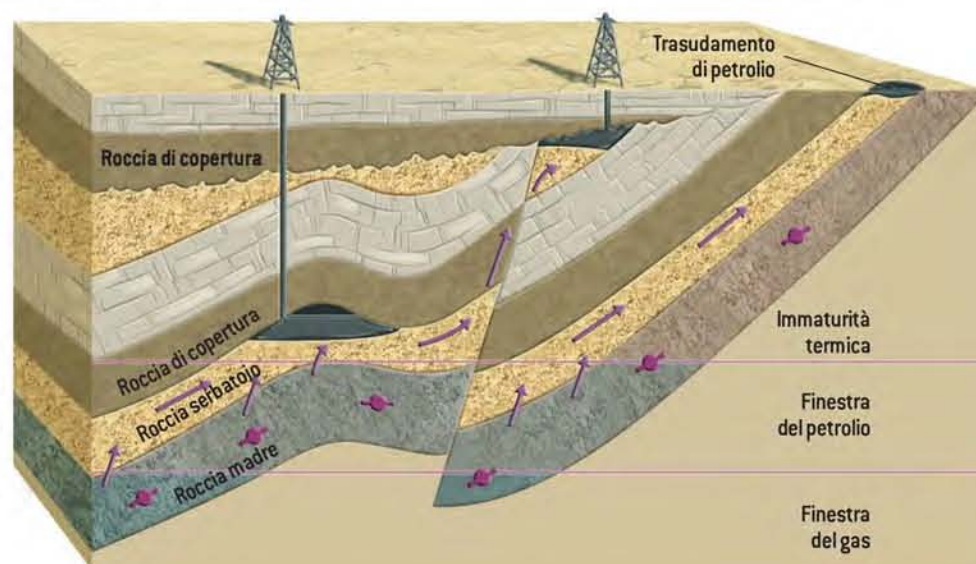
di Alain-Yves Huc

LO SFRUTTAMENTO DEI GIACIMENTI SOTTOMARINI a grande profondità, un tempo ritenuti inagibili, inizia oggi a essere preso in considerazione. L'Atlantico meridionale, in particolare a ovest dell'Africa e a est del Brasile, è stato propizio alla formazione di questi giacimenti grazie a un notevolissimo accumulo di sedimenti. Un sottosuolo favorevole, in cui erano presenti ricche rocce madri e pieghe opportune, ha favorito l'accumulo degli idrocarburi formatisi nel corso delle ere geologiche.

Entro il 2020 la popolazione mondiale risulterà raddoppiata rispetto al 1980, raggiungendo gli 8 miliardi di individui. Un tale incremento demografico dovrebbe comportare un aumento del 50 per cento del consumo mondiale di energia. Ma saranno sufficienti le nostre risorse energetiche per coprire questi bisogni? Nel complesso sì: esistono diversi modelli di produzione di energia e le riserve di combustibili fossili saranno sufficienti per una o due generazioni. Le riserve accertate di carbone corrispondono a 250 anni di consumo al ritmo attuale, mentre le riserve di petrolio e di gas naturale saranno sufficienti per parecchi decenni. I bisogni, però, sono distribuiti in modo disomogeneo: numerosi paesi in via di sviluppo consumano, per esempio, sempre più carburante per autotrazione.

Ora, le scoperte di giacimenti facilmente accessibili di idrocarburi liquidi si fanno sempre più rare. D'altronde la ricerca del gas naturale, a lungo trascurato, interessa sempre di più: si tratta di una fonte di energia fossile meno inquinante rispetto al carbone o agli idrocarburi liquidi. Infine, occorre tenere presente che il 70 per cento delle risorse mondiali di petrolio e il 40 per cento delle risorse di gas naturale sono concentrati in paesi del Medio Oriente.

La domanda crescente spinge gli operatori petroliferi più importanti a ricercare e a mettere in opera giacimenti che altrimenti verrebbero considerati non sfruttabili, come quelli del cosiddetto «offshore profondo», situati nei grandi bacini sedimentari sottomarini. Perché lo sfruttamento degli idrocarburi in queste condizioni sia redditizio, è necessario che i giacimenti contengano centinaia di milioni di barili (un barile corrisponde a 159 litri), e siano in grado di fornire almeno 10.000 barili al giorno. Un buon numero di questi campi petroliferi in acque profonde si trova nell'Atlantico meridionale, regione che contiene all'incirca il 7 per cento delle riserve mondiali di idrocarburi. È avvenuto così che, alla fine del 2001, la società TotalFinaElf mettesse in funzione al largo dell'Angola la più grande piattaforma petrolifera galleggiante al mondo. Chiamato Girassol (girasole, in portoghese), il campo petrolifero sottomarino che essa sfrutta si trova a 1400 metri di profondità. In questa installazione si pompano fino a 200.000 barili al giorno di un greggio di eccellente qualità, che vengono stoccati provvisoriamente sulla piattaforma stessa. La difficoltà dell'impresa era senza precedenti, date le condizioni particolari che vigono a così grande profondità. Mentre la temperatura dell'acqua sul fondo si aggira intorno ai 4 gradi Celsius, quella degli oli minerali raggiunge i 65 gradi Celsius in seno al giacimento. Ne escono a 58 gradi, e non devono in alcun caso scendere al di sotto dei 40 per evitare la formazione di tappi di paraffina. Dal momento che la roccia serbatoio è poco consolidata, capita che una parte dei sedimenti che la costituiscono venga estratta assieme al greggio e rischi di intasare le condotte di estrazione. La circolazione nelle condotte di una miscela di olio, acqua e sabbia mette la rete di estrazione a dura prova.

IN SINTESI

- La domanda crescente di prodotti petroliferi spinge le più importanti compagnie a ricercare e a mettere in opera giacimenti situati nei grandi bacini sedimentari sottomarini.
- La ricerca di campi petroliferi in acque profonde è stata resa possibile da un lato dalla migliore comprensione dei processi di formazione del petrolio e, dall'altro, dal perfezionamento delle tecniche di visualizzazione delle strutture geologiche.
- Per la formazione dei campi petroliferi è necessaria la presenza simultanea di una molteplicità di strutture e meccanismi geologici. In presenza di condizioni favorevoli, la storia termica della materia organica fossilizzata in seno alla roccia determina la sua trasformazione progressiva in specie chimiche di pesi molecolari sempre più piccoli, ossia in oli minerali o in gas.
- La storia geologica della rottura del continente primigenio di Pangea lungo il rift che, nel corso di 140 milioni di anni, ha dato luogo all'Oceano Atlantico meridionale mostra la presenza di tutte le condizioni perché si formassero petrolio e gas in alcune zone, in particolare al largo delle coste dell'Angola, del Congo, della Nigeria e del Gabon e, in misura minore, del Brasile.

UN SISTEMA PETROLIFERO necessita della presenza simultanea di diversi elementi: una roccia madre, una roccia serbatoio, una roccia di copertura e adeguate trappole (tettoniche o sedimentarie), nonché dei meccanismi geologici necessari alla formazione e all'accumulo del petrolio e del gas nei giacimenti. Negli strati profondi tende a formarsi di preferenza gas; al di sopra si forma petrolio; infine, negli strati superiori, la temperatura e i tempi di maturazione non sono stati sufficienti perché gli idrocarburi potessero formarsi.

Giacimenti simmetrici

La ricerca di campi petroliferi situati in acque profonde, e ancor più il loro sfruttamento, sono compiti davvero impegnativi. Nell'Atlantico meridionale, lo sfruttamento ha tratto vantaggio dai progressi compiuti, nel corso degli ultimi decenni, nella comprensione dei processi di formazione del petrolio; i geologi hanno migliorato non solo l'efficacia delle tecniche di visualizzazione delle strutture geologiche, ma hanno anche precisato il concetto di «sistema petrolifero». Di natura molto varia, i sistemi petroliferi all'origine dei giacimenti dell'Angola, del Congo, della Nigeria e del Gabon da un lato, e di quelli del Brasile dall'altro, condividono una storia comune. La loro formazione è avvenuta nel quadro generale dell'apertura dell'Atlantico meridionale, iniziata oltre 140 milioni di anni fa all'inizio del Cretaceo in seguito alla frammentazione del protocontinente Pangea. Questa origine comune è rivelata anche da strutture geologiche quasi simmetriche ai due lati dell'oceano, dove le variazioni locali della sedimentazione hanno condizionato il potenziale petrolifero regionale.

Dopo avere riassunto i concetti principali della geologia del petrolio, cercheremo di spiegare come mai il dominio profondo dell'Atlantico meridionale (tra 500 e 2000 metri di profondità) sia così ricco di petrolio; descriveremo inoltre le particolarità del dominio ultraprofondo (tra 2000 e 3000 metri di profondità), quello che le compagnie petrolifere prenderanno forse in considerazione un domani.

Che cos'è un sistema petrolifero? Il termine designa una porzione di bacino sedimentario nella quale si incontrano tutti i costituenti geologici indispensabili alla formazione e alla ritenzione del petrolio, e nella quale si sono avute le condizioni fisiche e chimiche indispensabili alla maturazione del petrolio o del gas naturale. I costituenti geologici, in numero di quattro, sono dati da una «roccia madre», una «roccia serbatoio», una formazione rocciosa di copertura e una «trappola». Inoltre, occorre che il processo di affossamento progressivo della roccia madre produca le condizioni termiche propizie alla maturazione chimica degli idrocarburi. Esaminiamo ciascuno di questi aspetti.

I sistemi petroliferi

I bacini sedimentari sono depressioni della crosta terrestre e sono in generale occupati da un mare o un oceano. Sono il prodotto di processi geodinamici associati agli spostamenti delle zolle della litosfera. La crosta terrestre è costituita da rocce cristalline di origine magmatica: granito per la crosta continentale e basalto per la crosta oceanica. Nel corso dei tempi geologici, i bacini si sono riempiti di materiali sedimentari, come le argille, le arenarie (sabbie consolidate), i carbonati (calcari) e le evaporiti (formazioni saline). Il riempimento dura in generale diverse decine di milioni di anni, al ritmo di alcuni millimetri all'anno in media. Il peso dei sedimenti così accumulati partecipa alla deformazione della crosta terrestre sottostante, effetto che si somma alle deformazioni dovute alla tettonica delle zolle. La depressione si accentua, e ciò conduce a depositi di sedimenti che sovente raggiungono lo spessore di diversi chilometri. Questo sprofondamento dei bacini sotto il doppio effetto della tettonica e del sovraccarico sedimentario viene denominato subsidenza, e nei casi estremi può raggiungere una ventina di chilometri.

Il Bacino parigino è un esempio di bacino sedimentario poggiante su un basamento che attualmente affiora nel Massiccio armoricano, nei Vosgi e nel Massiccio centrale; il riempimento ha uno spessore di 3000 metri nella sua parte più profonda. È in seno ai bacini sedimentari che gli idrocarburi si formano e rimangono intrappolati.

Primo costituente di un sistema petrolifero, la roccia madre è una roccia sedimentaria nella quale una quantità notevole di detriti organici si è accumulata in concomitanza con sedimenti minerali. Questa materia organica deriva dall'accumulo di resti più o meno ben conservati di tessuti di organismi. In gran parte si tratta di alghe planctoniche, di piante superiori e di batteri. Perché una roccia possa essere qualificata come roccia madre, occorre che il materiale organico da essa contenuto rappresenti almeno dall'1 al 2 per cento del peso della roccia stessa. Questo tipo di sedimento ricco in materiale organico è raro, dal momento che richiede condizioni particolari per formarsi. Soprattutto, richiede l'esistenza di un ecosistema in grado di produrre abbondante biomassa i cui resti, dopo essere sfuggiti alla decomposizione, possano rimanere incorporati nel sedimento che si deposita.

LA PIATTAFORMA GALLEGGIANTE che sfrutta il campo petrolifero di Girassol, al largo delle coste dell'Angola.

Le rocce madri

Il trasporto dal luogo di produzione biologica al sito di sedimentazione deve essere breve e l'ambiente di sedimentazione deve essere povero di ossigeno (ambiente anossico, detto anche anaerobico o euxinico). In caso contrario, i batteri aerobici e gli organismi bentonici proliferano e consumano il materiale biologico prodotto. Le rocce ricche in materiale organico sono perlopiù rocce argillose o marnose (misto di argilla e calcare). Hanno granulometria molto fine e, per questo fatto, sono poco porose e poco permeabili. Elemento essenziale di un sistema petrolifero, la roccia madre è una sorta di «fabbrica» di petrolio e gas naturale. Un bacino povero di sedimenti ricchi in materiale organico non può ospitare campi petroliferi. Non tutte le rocce madri sono equivalenti: al contrario, differiscono notevolmente in quanto a tenore di materiale organico, a volume e a natura del materiale organico fossilizzato da esse contenuto.

Le si classifica in tre grandi categorie. Il tipo I è formato principalmente da resti di membrane batteriche e di alghe unicellulari che vivono in ambienti lacustri. Poco diffuso, questo tipo è di eccellente qualità, dal momento che dal 70 all'80 per cento in peso del materiale organico preservato nel sedimento può trasformarsi in idrocarburi qualora le condizioni siano favorevoli. Le rocce madri di tipo I sono, per esempio, presenti nei sedimenti lacustri dei margini occidentali africani e dei margini orientali sudamericani (inizio Cretaceo), oppure sono associate a diversi bacini del Terziario del Sud-est asiatico o a certi bacini continentali cinesi.

Il tipo II, più comune, è formato da resti di alghe planctoniche marine. Le rocce madri del Mare del Nord, del Venezuela e dell'Arabia Saudita ne sono alcuni esempi. Fino al 40-60 per cento in peso del materiale organico che esse contengono si trasforma in idrocarburi nelle condizioni ottimali.

Infine, il tipo III, di cui una forma particolare è data dal carbon fossile, deriva dai resti di vegetali superiori terrestri. È, per esempio, caratteristico delle rocce madri derivate da un ambiente deltizio. Il potenziale petrolifero di questo materiale organico è relativamente debole, dal momento che soltanto il 10-30 per cento in peso del materiale organico può trasformarsi in idrocarburi. In compenso, dato che gli impilamenti sedimentari che contengono queste rocce madri hanno sovente uno spessore di diverse centinaia di metri, se non addirittura di diversi chilometri, la quantità di petrolio che se ne può spesso ricavare è comunque cospicua.

Il secondo costituente di un sistema petrolifero è un insieme drenante costituito in generale da rocce porose e permeabili, nonché da fratture e faglie tali da consentire la migrazione degli idrocarburi all'interno del bacino sedimentario. Le rocce porose e fratturate possono anche svolgere il ruolo di rocce serbatoio, dove vanno ad accumularsi gli idrocarburi. La porosità delle rocce serbatoio varia dal 5 al 30 per cento del volume della roccia. Il petrolio e il gas formatisi nella roccia madre sono espulsi per effetto della pressione verso le rocce porose e migrano in seno a esse, dato che la loro densità è inferiore a quella dell'acqua che impregna la totalità delle rocce sedimentarie: la spinta di Archimede, la quale fa sì che il petrolio galleggi sull'acqua, provoca la migrazione degli idrocarburi verso la superficie.

Terzo costituente, la roccia di copertura si situa al di sopra di queste formazioni permeabili. Grazie alla propria impermeabilità, essa confina gli idrocarburi nel sistema poroso: può essere costituita da rocce argillose oppure da formazioni saline. L'assenza di una roccia di copertura fa sì che gli idrocarburi si disperdano nel bacino sedimentario e tendano a sfuggire verso la superficie. Quando raggiungono il suolo, gli idrocarburi finiscono per venire distrutti a seguito di meccanismi chimici o biologici, come quelli che intervengono nei riversamenti accidentali di petrolio. (Si stima che le dispersioni naturali di petrolio nell'ambiente equivalgano in volume ai riversamenti causati dall'uomo.)

Quarto costituente di un sistema petrolifero, la trappola è rappresentata da un ostacolo geologico che arresta la progressione degli idrocarburi nel loro tragitto verso la superficie. Esistono due tipi di trappole: le pieghe strutturali sono configurazioni geometriche particolari propizie all'accumulo del petrolio, come certe pieghe anticlinali o come certe faglie che pongono barriere impermeabili alla migrazione dei fluidi; le trappole stratigrafiche risultano invece da variazioni locali della porosità e delle permeabilità della roccia serbatoio. Può trattarsi, per esempio, del passaggio da una roccia permeabile a una roccia impermeabile o della presenza di una cementazione minerale tale da ostruire i pori della roccia.

Ma tutto questo non basta ancora. Perché un bacino sedimentario dotato di rocce madri, di rocce serbatoio, di roccia di copertura e di trappole produca effettivamente petrolio, occorre anche che abbia avuto una storia termica adeguata. Ciò avviene quando la roccia madre sprofonda progressivamente nel corso di decine di milioni di anni di riempimento del bacino sedimentario associato a subsidenza. Dato che la temperatura aumenta di circa 30 gradi Celsius per chilometro, il calore presente in profondità provoca la piroscissione della materia organica fossilizzata in seno alla roccia, vale a dire la sua trasformazione progressiva in specie chimiche di pesi molecolari sempre più piccoli. La miscela di tali specie chimiche costituisce il petrolio. Se la temperatura aumenta ancora e la piroscissione progredisce, il petrolio verrà trasformato in gas. A seconda delle condizioni vigenti, si ottengono oli minerali (nella finestra del petrolio) o gas (nella finestra del gas). La piroscissione è un processo cinetico, il che significa che il tempo svolge un ruolo essenziale. Una durata di piroscissione abbastanza lunga può compensare una temperatura troppo bassa. Per esempio, se la roccia madre terziaria che è all'origine del petrolio della California ha raggiunto la sua finestra del petrolio (a 135 gradi Celsius) in capo a 20 milioni di anni, saranno occorsi almeno 100 milioni di anni alla roccia madre del Bacino parigino per raggiungere i 100 gradi Celsius, vale a dire la propria finestra del petrolio.

LA FASE DI RIFT si caratterizza per l'instaurazione di un corridoio lungo diverse migliaia di chilometri, nel quale si succedono zone di sprofondamento occupate da grandi laghi. È in questi laghi che si sono depositati spessi strati sedimentari ricchi in materiale organico di tipo I, intercalati con sedimenti sabbiosi e carbonatici che possono presentare le proprietà di una roccia-serbatoio.

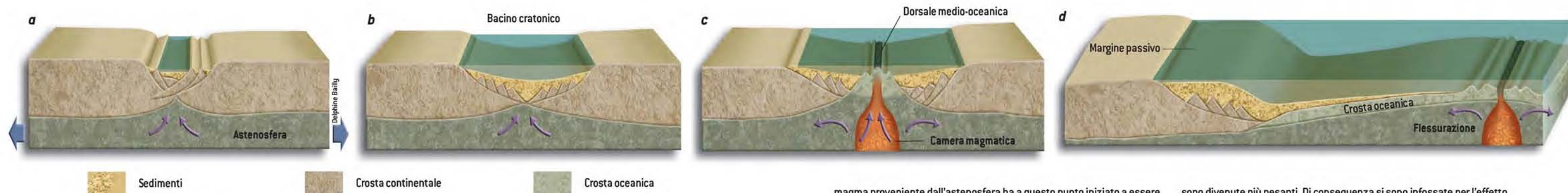
L'AUTORE

ALAIN-YVES HUC dirige il Centro di esplorazione della École du pétrole et des moteurs, dell'Institut français du pétrole.

Gli idrocarburi vengono espulsi dalla roccia madre: è questa la cosiddetta migrazione primaria. Questa espulsione si produce verso le rocce porose che si trovano al di sopra o al di sotto della roccia madre. Lo spostamento degli oli (o del gas) è indotto dalla differenza di pressione tra le rocce porose e la roccia madre (più comprimibile). In seguito alla loro espulsione dalla roccia madre, gli idrocarburi si spostano verso la superficie del bacino lungo i pori e le fratture: è questa la cosiddetta migrazione secondaria. Questo spostamento prosegue fino a che gli idrocarburi non si accumulano in una trappola.

A questo punto possiamo applicare i concetti generali appena introdotti alla descrizione delle province petrolifere dell'Atlantico meridionale. La formazione di questo oceano ha avuto il suo esordio 140 milioni di anni fa, all'inizio del Cretaceo. Un immenso protocontinente, il Pangea, si è scisso in due continenti che avrebbero dato luogo all'America e all'Africa. Questa separazione è stata preceduta dall'assottigliamento della crosta terrestre dovuto alla risalita di rocce magmatiche. L'assottigliamento fu seguito dalla fase di rift, vale a dire dalla lacerazione della crosta continentale. In corrispondenza di questo stadio, quello che sarebbe diventato l'odierno Atlantico meridionale si presentava come una successione di fosse tettoniche grosso modo allineate e occupate da grandi laghi. In questi laghi si depositavano spesse coltri sedimentarie ricche in materiale organico di tipo I, intercalate con sedimenti sabbiosi e carbonatici dotati delle caratteristiche di una roccia serbatoio.

La formazione dell'Atlantico meridionale

A questa situazione fece seguito una fase di apertura: allontanandosi, i domini continentali fecero spazio a un bacino sedimentario via via più largo. Nel corso di questa deriva, i continenti africano e americano trascinarono con sé, conservandoli sui rispettivi margini, i resti dei bacini lacustri di rift. Le rocce madri più ricche di petrolio dell'Atlantico meridionale sono situate in questi resti di bacini lacustri, all'origine di una gran parte delle riserve petrolifere dell'Angola, del Congo, del Gabon e del Brasile. Allontanandosi, i due continenti hanno in seguito permesso alle acque oceaniche di riversarsi periodicamente nei bacini in formazione. Il riempimento episodico di questi bacini da parte delle acque marine si alternava con periodi di isolamento dall'oceano, nel corso dei quali le acque marine rimaste intrappolate evaporavano, lasciando sul posto

I DIFFERENTI STADI DELL'APERTURA DELL'ATLANTICO MERIDIONALE. L'apertura ha inizio con la rottura (fase di rift, *a*) della massa continentale iniziale, il Pangea, provocata da un fenomeno regionale di risalita magmatica lungo la futura dorsale medio-oceanica. La crosta continentale si è lacerata in vari punti, e le fosse che ne risultano vengono occupate da grandi laghi. Il corridoio iniziale si è progressivamente allargato dando luogo a un bacino marino, il cosiddetto bacino cratonico (*b*), il cui fondo è costituito da crosta continentale. Il magma proveniente dall'astenosfera ha a questo punto iniziato a essere emesso al livello della dorsale medio-oceanica, formando una crosta basaltica che costituirà il fondo dell'oceano: è questa la fase di deriva (*c*). Con il proseguire dell'apertura oceanica, le parti più antiche di questa crosta oceanica, vale a dire quelle più prossime ai margini continentali, si sono raffreddate progressivamente; la loro densità è aumentata ed esse sono divenute più pesanti. Di conseguenza si sono infossate per l'effetto del proprio stesso peso: è il fenomeno di flessurazione (*d*). Negli spazi così creati, i sedimenti strappati ai continenti si sono accumulati a partire dalla fine del Cretaceo, e soprattutto nel Terziario, cioè 50 milioni di anni fa circa. A quel momento si erano prodotte tutte le condizioni perché si formassero petrolio e gas in alcune zone.

EVOLUZIONE DEL REGIME DI SEDIMENTAZIONE nel corso dell'apertura dell'Atlantico meridionale. Dopo la rottura continentale (*a*), le depressioni sono occupate da laghi nei quali si accumulano rocce madri di tipo I. Il corridoio iniziale ha dato luogo a un bacino oceanico stretto dalla profondità irregolare (*b*). Questo bacino misurava 3500 chilometri da nord a sud e 600 chilometri nella sua parte meridionale, la più larga. Periodicamente isolato dall'oceano mondiale, esso subiva fenomeni di evaporazione che hanno favorito l'accumulo di quantità importanti di sale e di sedimenti ricchi in materiale organico di tipo II (*b*). Il bacino si è progressivamente allargato, ma non comunica in modo costante e diretto con l'oceano mondiale, a causa della presenza di barriere fisiche. Questo confinamento ostacola la circolazione delle acque e la loro ossigenazione, e favorisce l'accumulo di materiale organico e la formazione di rocce madri di tipo II (*c*). L'apertura prosegue, l'oceano si arricchisce in ossigeno nel Cretaceo superiore, dimodoché le condizioni propizie alla messa in posto di rocce madri vengono meno; i sedimenti sono a questo punto costituiti essenzialmente da marne (*d*). A partire dalla fine del Cretaceo, e soprattutto nel Terziario, spessi strati di sedimenti di origine continentale riempiono lo spazio liberato dalla sprofondamento. L'afflusso di materiale sedimentario, e di conseguenza lo spessore dei sedimenti deposti, sono maggiori dal lato africano, in virtù di fenomeni erosivi più intensi (il continente è sollevato poiché entra in collisione con la zolla europea).

Cretaceo inferiore — *Cretaceo medio*

a — 140 milioni di anni — Rocce madri lacustri (tipo I)

b — 120 milioni di anni — Sale

c — 100 milioni di anni — Rocce madri marine del Cretaceo (tipo II)

Delphine Bailly

Cretaceo superiore — *Terziario*

spessi strati di sali. Datati a circa 120 milioni di anni fa, questi strati hanno ricoperto i bacini lacustri, dando luogo alle formazioni saline dell'Atlantico meridionale.

Con il progredire dell'apertura del nuovo oceano, la giovane dorsale medio-oceanica cominciò a emettere le rocce basaltiche all'origine della crosta oceanica. Progressivamente, si instaurò il regime marino. La deposizione episodica di sali fu sostituita da una sedimentazione calcarea e marnosa, ma anche arenacea, tale da propiziare la formazione di eccellenti rocce serbatoio. Tuttavia, questo nuovo oceano era ancora relativamente confinato e poco accessibile agli scambi di acque marine. Questa situazione, favorevole all'anossia, permise il deposito intermittente di nuove rocce madri di tipo II. Ciò accadeva circa 80 milioni di anni fa. Una volta che il bacino oceanico divenne troppo ampio per consentire il mantenimento delle condizioni di anossia, cominciarono ad affluire acque con ossigeno disciolto. Le condizioni di preservazione delle rocce madri, a questo punto, non erano più assicurate.

Bisognerà attendere la fine del Cretaceo, ma soprattutto l'inizio del Terziario, circa 50 milioni di anni fa, per il riapparire di condizioni propizie alla messa in posto di nuovi sistemi petroliferi. Questo avvenne dopo un sufficiente accumulo di sedimenti generati dall'erosione dei versanti montuosi continentali: un accumulo avvenuto perlopiù nelle zone antistanti i delta dei fiumi. Questo regime di deposizione è stato favorito dal raffreddamento della crosta oceanica più antica, quella cioè situata in prossimità dei margini continentali. Questo raffreddamento rende la crosta più densa e, di conseguenza, più pesante. La crosta tende allora a sprofondare, per effetto di un meccanismo che i geologi chiamano flessurazione. Il fenomeno lascia uno spazio disponibile per l'accumulo di grandi quantità di sedimenti di provenienza continentale. L'ammassamento di grandi quantità di sedimenti provoca lo sprofondamento e la conseguente maturazione termica delle rocce madri. Spesse sequenze sedimentarie argillo-sabbiose si accumularono per esempio nel delta del Niger. È in questi complessi sedimentari detritici che si trovano talvolta livelli ricchi in materiale organico di tipo III, contenenti detriti di vegetali superiori terrestri. Gli idrocarburi si trovano confinati in canali sabbiosi, resti di corridoi sottomarini di trasporto di sedimenti verso le grandi profondità. Questi giacimenti sono incassati in argille che fungono da roccia di copertura.

Questa storia geologica è all'origine di una grande ricchezza petrolifera. Diverse caratteristiche della regione spiegano il perché. Innanzitutto, la regione contiene diverse famiglie di rocce madri di età geologiche differenti. Questa situazione ha prodotto un gran numero di sistemi petroliferi confrontabili da una parte e dall'altra dell'Atlantico. Per esempio, il bacino di Campos al largo del Brasile e quello del basso Congo contengono entrambi rocce madri lacustri (tipo I) depositatesi agli esordi della formazione dell'Atlantico, e rocce madri marine (di tipo II) più recenti, datate al Cretaceo medio (100 milioni di anni fa).

Tuttavia, mentre le rocce madri congolesi di tipo I e II hanno prodotto idrocarburi, solo le rocce lacustri di tipo I hanno raggiunto la finestra del petrolio dal lato brasiliano.

Da che cosa deriva questa asimmetria? Per l'essenziale, risulta dal sollevamento dello zoccolo continentale africano dovuto alla collisione delle zolle africana ed europea. Facendo aumentare il tasso di erosione dell'Africa, questo sollevamento di masse continentali ha mobilizzato grandi quantità di sedimenti alluvionali fluviali, che si sono depositati nei delta per tutto il Terziario (da 65 a 2 milioni di anni fa), per raggiungere in qualche caso 11 chilometri di spessore, come alla foce del Niger. Ciò spiega come molte rocce madri africane di tipo II depositate successivamente ai livelli salini abbiano prodotto idrocarburi, mentre dal lato brasiliano solo le rocce madri lacustri di tipo I deposte prima del livello salifero hanno raggiunto la finestra del petrolio.

La ricchezza petrolifera dell'Atlantico meridionale

Oltre a questa sedimentazione imponente, i margini dell'Atlantico meridionale presentano un gran numero di faglie. Queste ultime costituiscono le vie di drenaggio attraverso le quali gli idrocarburi migrano dalle rocce madri verso i giacimenti superiori. Queste faglie si sono originate durante la fase di apertura, o per scivolamento di blocchi di sedimenti nel corso di fasi successive. Esse sono spesso associate alla presenza di strati di sale depostisi dopo gli episodi di sedimentazione lacustre. Il sale crea superfici di scollamento sulle quali i sedimenti inclinati per effetto della flessurazione possono scorrere facilmente. Come caratteristica ulteriore, i margini dell'Atlantico meridionale contengono eccellenti rocce serbatoio distribuite in tutta la sequenza sedimentaria. Rocce di questo tipo sono frequenti nei sedimenti presaliferi, nei calcari postsaliferi e nei giacimenti arenacei del Terziario. Esse sono costituite dai canali e dai lobi sabbiosi depositatisi lungo la (e ai piedi della) scarpata continentale. Appena qualche anno fa, si ignorava ancora la loro distribuzione e la loro struttura interna. In certi casi questi giacimenti sono mal consolidati e questa è una fonte di difficoltà tecniche in fase di sfruttamento del campo petrolifero (per i rischi di intasamento che comporta). D'altronde, le coperture associate a questi giacimenti sono talvolta poco compatte e lasciano sfuggire gli idrocarburi.

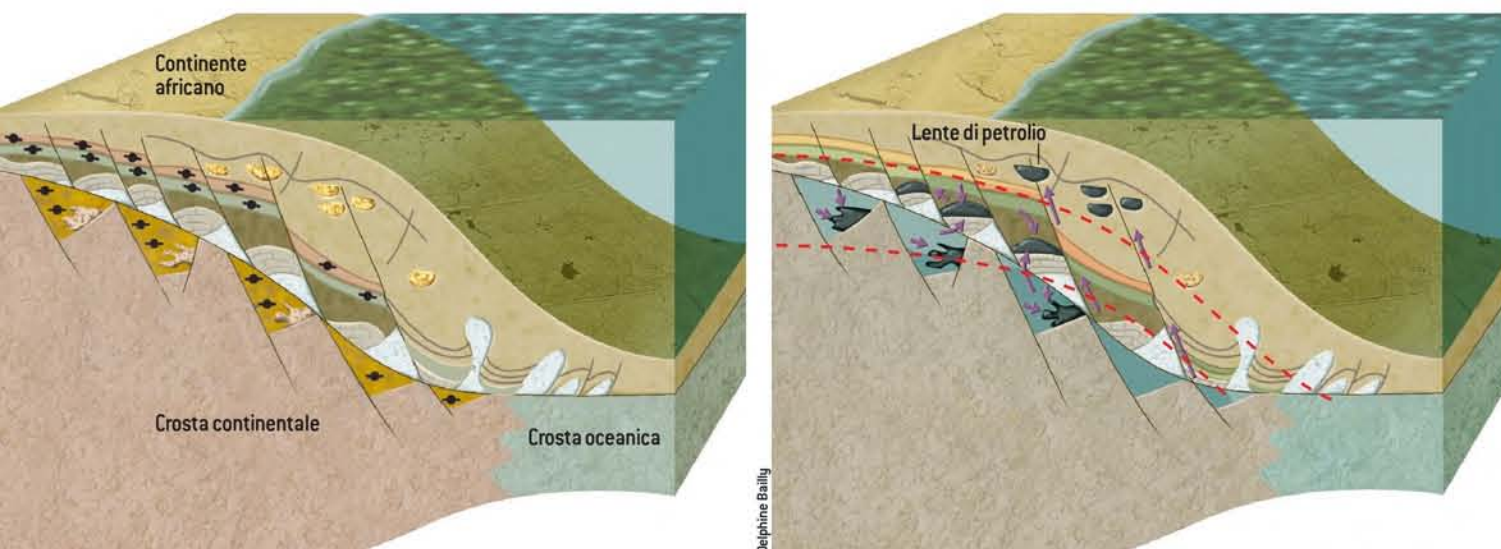
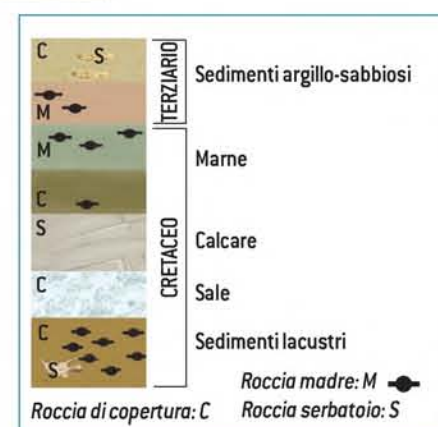
Al di sotto del fondo dell'Atlantico si trovano anche buone rocce di copertura, sia argillose sia saline. Non lontano dalle coste, lo strato di sale è continuo, ma più al largo risulta spezzettato. Sempre più discontinuo via via che ci si allontana dal continente, lo strato salino finisce per formare «zattere» isolate le une dalle altre. Questa disposizione degli strati salini si traduce nel confinamento del petrolio al di sotto del sale e, in assenza del sale, nel passaggio del petrolio verso gli strati superiori. Per esempio, la geometria delle formazioni sedimentarie dei margini dell'Atlantico meridionale ha moltiplicato le trappole. Trappole che possono prendere la forma di coperchi salini, grandi pieghe anticlinali calcaree del Cretaceo e grandi ondulazioni in seno ai sedimenti del Terziario contenenti canali sabbiosi inglobati in argille impermeabili.

Durante i 140 milioni di anni di storia geologica dell'Atlantico si sono formati numerosi sistemi petroliferi; successivamente i loro serbatoi si sono riempiti di petrolio e di gas. Alcuni di questi giacimenti si sono formati al di sotto dei 2000 metri di profondità d'acqua. In tal modo, essi sono rimasti per molto tempo al di fuori della portata di qualsiasi sfruttamento, ma nell'ultimo decennio molte grandi compagnie petrolifere hanno acquisito la tecnologia per lavorare oltre i 500 metri di profondità, e in qualche caso a migliaia di metri al di sotto della superficie oceanica.

Fino a che punto si può estendere il quadro geologico dei domìni profondi alle zone ultraprofonde? Attualmente, i geologi dispongono di concetti e di metodi che permettono loro di ovviare alle lacune esplorative relative al dominio profondo. Essi sanno come si forma un sistema petrolifero e riescono a visualizzarne la struttura e il contenuto per mezzo delle tecniche sismiche a riflessione, una sorta di ecografia applicata alle strutture geologiche. Per mettere in opera questo metodo si generano onde di pressione alla superficie marina, per esempio mediante cannoni ad aria; poi si utilizzano le onde riflesse dalle differenti strutture geologiche in modo da creare immagini di ciò che si trova al di sotto del fondo marino.

Le incertezze legate all'esplorazione dell'ultraprofondo

Queste immagini di ciò che giace in profondità sono a due e, sempre più spesso, tre dimensioni. Devono essere calibrate con l'aiuto di tutte le informazioni disponibili sulla zona in oggetto, e in particolare con quelle desunte dai sondaggi diretti. La ricerca si basa quindi sulle simulazioni digitali dei sistemi petroliferi. Grazie a questi modelli si ricostruisce in particolare la storia del riempimento di un bacino nel corso dei tempi geologici. Si può così risalire alla storia termica dei sedimenti, in particolare a quella della roccia madre, della formazione degli idrocarburi, della loro migrazione in seno al bacino e infine del loro accumulo nelle trappole. Nel migliore dei casi, queste simulazioni giungono a dare indicazioni anche sulla natura degli idrocarburi contenuti nei giacimenti (se si tratti cioè di petrolio oppure di gas). Anche se permangono alcune incertezze in quanto alla precisione delle immagini e ai risultati delle simulazioni, il metodo riduce notevolmente il rischio di fallimento di una trivellazione.

Fino a quale profondità si possono trovare rocce madri e

SEZIONE GEOLOGICA SCHEMATICA di un margine dell'Atlantico meridionale, al largo del Gabon, del Congo e dell'Angola. Le scale non sono rispettate per quanto riguarda lo spessore della crosta continentale e oceanica, che misurano rispettivamente 5-15 e 30-65 chilometri. È stato schematizzato il sottosuolo della costa fino a un centinaio di chilometri verso il largo. Lo spessore della successione sedimentaria è qui rappresentato fino a una decina di chilometri. Sedimenti lacustri, contenenti rocce madri di tipo I, sono confinati in depressioni della crosta continentale (*a sinistra*). Essi sono sormontati da depositi di sale, da rocce calcaree (che costituiscono spesso ottimi serbatoi), e poi da marne, di cui alcune costituiscono rocce madri di tipo II. Al di sopra, gli strati argillo-sabbiosi contengono rocce madri di tipo III e serbatoi localizzati in canali e in lobi sabbiosi. In presenza di condizioni termiche adeguate, in queste differenti rocce madri si è avuta la formazione di idrocarburi. L'espulsione dalle rocce madri e la migrazione secondaria lungo le vie di drenaggio (*a destra, frecce*) indirizzano gli idrocarburi (petrolio e gas) verso trappole, dove sono trattenuti da rocce di copertura impermeabili. Nella finestra del petrolio (*tra le due linee tratteggiate in rosso*), gli idrocarburi sono dati da petrolio. La finestra del gas è situata appena sotto la finestra del petrolio (*al di sotto della linea tratteggiata inferiore*).

serbatoi potenziali? Per il momento non lo sappiamo. Una seconda incertezza è legata alla variazione dello spessore dei sedimenti. Tale spessore aumenta fino al dominio profondo sul margine continentale, ma poi diminuisce inesorabilmente via via che ci si sposta verso il largo. Ciò significa che, avendo subìto uno sprofondamento minore, le rocce madri sono meno «mature» a parità di età. In altri termini, le rocce madri lacustri che nel dominio profondo si trovano nella finestra del gas, nel dominio ultraprofondo - sempre che esistano - dovrebbero trovarsi nella finestra del petrolio.

Analogamente, le rocce madri cretacee che si trovavano nella finestra del petrolio nel dominio profondo possono anche essere immature nel dominio ultraprofondo. L'effetto dello sprofondamento è d'altronde più importante rispetto al flusso termico via via che ci si sposta verso il largo: la crosta continentale, contenente isotopi radioattivi sorgenti di calore, si assottiglia, e viene rimpiazzata da una crosta oceanica povera in elementi radioattivi. Il raffreddamento della crosta e la diminuzione dello spessore dei sedimenti, congiuntamente, impongono un limite estremo al di là del quale nessun sistema petrolifero è più in grado di produrre idrocarburi. Le simulazioni ci diranno quale sia questo limite ultimo nel momento in cui avremo raccolto una quantità sufficiente di dati provenienti dal dominio ultraprofondo e li avremo calibrati.

Le zone del bacino sedimentario situate a profondità molto grande sono spesso assai complesse dal punto di vista geologico. Le loro strutture tormentate risultano dalla tettonica complessiva legata ai movimenti gravitativi subiti. La forte inclinazione dei blocchi sedimentari e la presenza di sale complicano l'interpretazione delle immagini sismiche del sottosuolo. Infine, è possibile che i giacimenti ultraprofondi siano il frutto di una formazione a temperatura non troppo elevata. In questi casi, la vita dei batteri può essere mantenuta (essa non scompare del tutto che al di sopra dei 90 gradi Celsius). I petroli di alcuni di questi giacimenti subiscono una biodegradazione che li trasforma in «olio pesante», un liquido denso e viscoso poco ricercato e difficile da estrarre.

Queste difficoltà e questi rischi sono considerevoli. E ancora negli anni settanta gli ostacoli tecnici e scientifici all'esplorazione e allo sfruttamento dei giacimenti del dominio profondo sembravano insormontabili. Nondimeno, alcune compagnie petrolifere si sono lanciate nell'impresa, e la produzione è già cospicua. Forse ci troviamo oggi, di fronte al dominio ultraprofondo, nella stessa situazione in cui eravamo rispetto al dominio profondo negli anni settanta? Dovremo pazientare ancora alcuni anni per avere la risposta.

BIBLIOGRAFIA

BOIS DE LA TOUR X., *Le pétrole, une épopée,* Collezione «Explora», Press Pocket, 1993.

MELLO M. e KATZ B., *Petroleum Systems of South Atlantic Margins*, in «American Association of Petroleum Geologists», 73, 2000.

SUSBIELLES G., *20 ans dans l'amont pétrolier*, in «Pétrole et Techniques», n. 429, pp. 35-64, 2000.

HUC A.-Y., *Le pétrole*, Éditions du Pommier, serie «Graines de sciences» (in corso di stampa).

www.aftp.net

www.ggl.ulaval.ca

I paesaggi alieni di MARTE

Il Pianeta rosso rivela una sorprendente varietà di fenomeni morfologici e climatici

di Arden L. Albee

Il capitano John Carter, protagonista dei romanzi di avventura di Edgar Rice Burroughs, era un gentiluomo virginiano e ufficiale dell'esercito confederato. Ridotto in povertà dopo la Guerra di secessione americana, partecipò a una corsa all'oro in Arizona e qui, inseguito da guerrieri Apache, cadde e batté il capo. Quando riprese i sensi, si ritrovò su un pianeta arido con due satelliti, popolato da animali a sei zampe e da bellissime principesse che chiamavano il loro mondo «Barsoom». Il paesaggio mostrava una sconcertante somiglianza con quello dell'Arizona meridionale; non era troppo dissimile dalla Terra, ma più antico ed eroso. «La loro è una dura e spietata lotta per l'esistenza su un pianeta morente» scrisse Burroughs nel primo romanzo della serie.

OCCORREREBBERO CIRCA 5 MINUTI per attraversare a piedi l'area mostrata in questa immagine, sul lato nord del cratere Newton, nell'emisfero meridionale di Marte. L'ipotetico escursionista lascerebbe le proprie impronte sul suolo ricoperto da una leggera brina (*aree brillanti*), supererebbe dune di sabbia accumulata dal vento e scavalcherebbe incisioni forse prodotte dallo scorrere dell'acqua. Queste strutture morfologiche probabilmente continuano a formarsi ancora oggi. Come altre immagini del Mars Global Surveyor, questa è ottenuta componendo riprese in scala di grigio ad alta risoluzione e a colori a bassa risoluzione; i colori sono solo un'approssimazione della realtà, ma il grado di dettaglio è incredibilmente superiore rispetto alle vaghe e spesso fantasiose rappresentazioni di Marte di un secolo fa (*qui sopra*).

10 METRI

Non solo gli scrittori di fantascienza, ma anche gli scienziati spesso dipingono Marte come una versione «estrema» della Terra: più piccolo, freddo e arido, ma modellato da processi essenzialmente identici. Ancora nel corso del XX secolo, molti erano convinti che il Pianeta Rosso possedesse acqua corrente e un'abbondante vegetazione. La somiglianza con la Terra parve totalmente smentita quando le sonde inviate alla fine degli anni sessanta rivelarono un mondo desertico e coperto di crateri, analogo alla Luna. Un nuovo colpo di scena si ebbe con la scoperta di altissime montagne, canyon profondi e complessi andamenti climatici. Le immagini dei Viking e di Mars Pathfinder, ottenute dalla superficie marziana, appaiono curiosamente simili a paesaggi terrestri. Proprio come Burroughs, anche gli scienziati di oggi paragonano le regioni equatoriali di Marte al Sud-ovest americano. Per le zone polari, il modello sono le Dry Valleys dell'Antartide, un deserto gelato circondato da una distesa di ghiaccio senza fine.

Ma se c'è una cosa che gli studiosi hanno imparato dalla recente esplorazione di Marte, è che simili confronti devono essere stabiliti con la massima cautela. Negli ultimi cinque anni le sonde hanno raccolto più informazioni sul Pianeta Rosso di tutte le precedenti missioni combinate. Marte si è rivelato un pianeta molto diverso e più complicato di quanto si ritenesse in precedenza. Anche il problema principale - Marte è mai stato caldo e umido, e forse adatto all'evoluzione della vita? - è più sfumato di quanto si tenda a immaginare. Per comprendere Marte, gli scienziati non possono farsi accecare da ciò che sanno della Terra. Il Pianeta Rosso è un luogo unico.

Un pianeta polveroso

L'esplorazione di Marte ha avuto i suoi alti e bassi. Nell'ultimo decennio la NASA ha perso ben tre veicoli spaziali: Mars Observer, Mars Climate Orbiter (che avrebbe dovuto essere un parziale sostituto di Mars Observer) e Mars Polar Lander. Negli ultimi tempi, però, il programma ha fatto registrare una serie di successi. Mars Global Surveyor trasmette immagini e raccoglie spettri nell'infrarosso e altri dati in maniera continuativa dal 1997, ed è oggi la decana di una vera e propria famiglia di sonde dedicate allo studio di questo pianeta. Mars Odyssey è in orbita da oltre un anno, impegnata nel costruire mappe del contenuto di acqua del terreno a bassa profondità e nel riprendere immagini infrarosse della superficie. È recentissimo il lancio da parte della NASA dei Mars

IL TERRENO STRATIFICATO DI MARTE ha il curioso aspetto di una carta topografica con indicate le isoipse. L'immagine mostra una parte del fondo di Candor Chasma, una gola che appartiene al sistema di canyon della Valles Marineris. Sono stati identificati 100 strati distinti, ognuno dello spessore di circa 10 metri. Potrebbero essere costituiti da rocce sedimentarie depositate dall'acqua, presumibilmente prima della genesi del canyon. In alternativa, gli strati potrebbero essere composti da polvere depositata da processi atmosferici ciclici. Questa immagine è stata ottenuta da Mars Global Surveyor.

IN SINTESI

- Due missioni in corso su Marte, Mars Global Surveyor e Mars Odyssey, stanno raccogliendo dati di difficile interpretazione sul Pianeta rosso. A quanto pare, il paesaggio marziano è stato modellato in miliardi di anni dagli effetti di ghiaccio, vento e ruscellamento. Questi processi mostrano sia somiglianze sia differenze con quelli in atto sulla Terra. Le analogie con ciò che accade sul nostro pianeta si sono dimostrate talvolta fuorvianti.
- La questione se Marte abbia mai avuto condizioni climatiche miti è più complessa che mai. I dati raccolti dalle sonde non sembrano dare indicazioni univoche. Tre nuove missioni, due americane e una europea, potrebbero dare un contributo risolutivo.

Exploration Rover, successori del famoso modulo Sojourner di Mars Pathfinder (*si veda la finestra a pagina 62*). Quasi contemporaneamente è partito il Mars Express dell'ESA, con il suo lander Beagle 2. La sonda Nozomi, inviata dall'Institute of Space and Astronautical Science del Giappone, dovrebbe raggiungere Marte nel mese di dicembre.

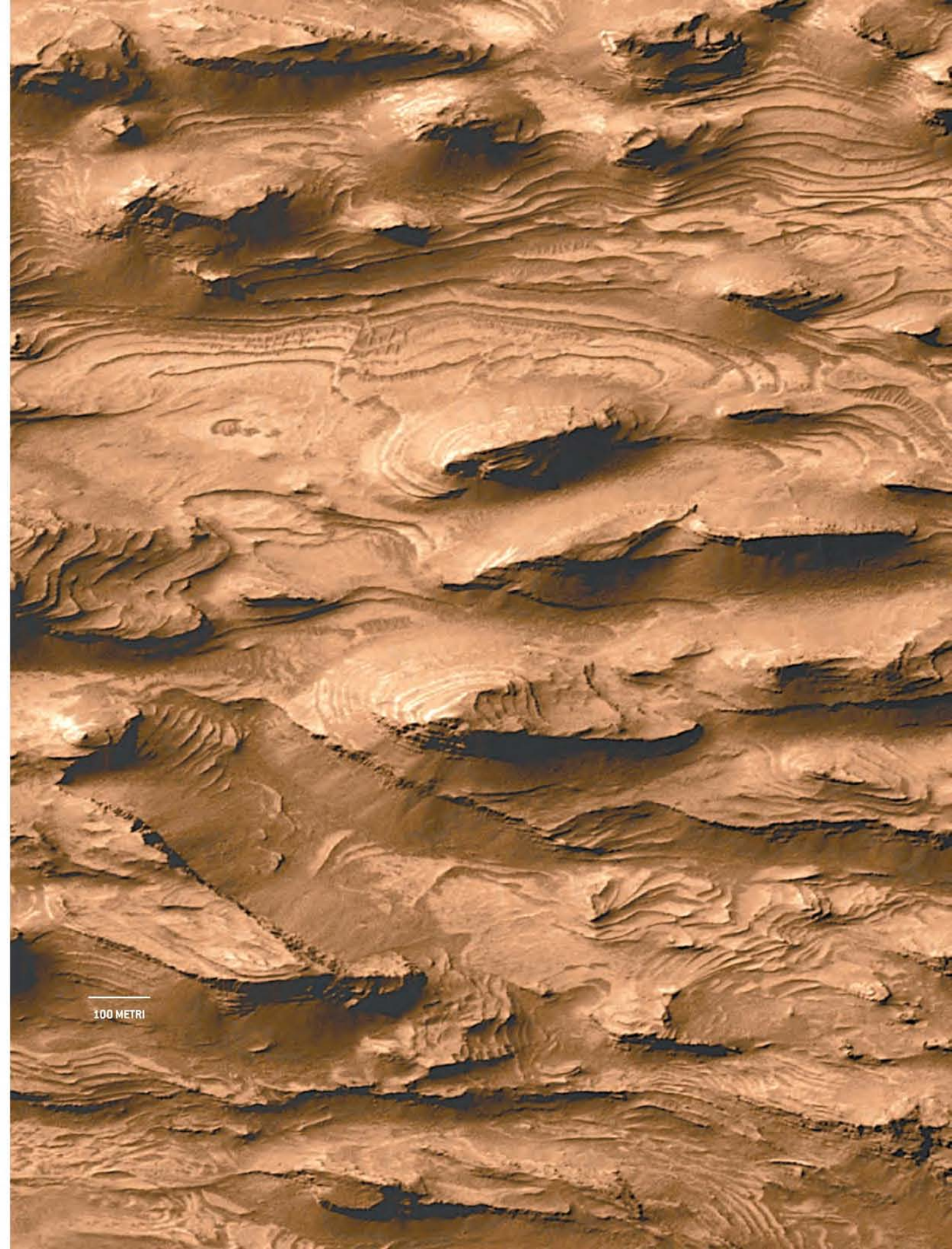
Mai prima d'ora è stata disponibile una documentazione così vasta sui processi che operano alla superficie e nell'atmosfera di Marte (*si veda la finestra a pagina 63*). Sono stati studiati anche i crateri, i canyon e i vulcani che rappresentano grandiosi resti del lontano passato. Ma vi è una notevole lacuna nelle nostre conoscenze: le testimonianze antiche e quelle attuali sono separate da miliardi di anni. Non si conoscono le condizioni e i fenomeni che modellarono Marte per gran parte della sua storia; e ancora di meno si sa sui processi geologici interni.

Oggi il Pianeta Rosso differisce dalla Terra per molti aspetti immediatamente evidenti. In primo luogo, è ricoperto da polvere. Gran parte della superficie terrestre è costituita da suolo generato dalla disgregazione chimica della roccia sottostante e, in talune regioni, di detriti glaciali. Ma buona parte della superficie marziana è composta da polvere: materiale a grani molto fini che si è depositato dall'atmosfera. Essa riveste ogni struttura, con l'eccezione dei versanti più ripidi, soffocando sotto una coltre l'antico paesaggio; forma uno spesso manto anche sui vulcani più alti. Le regioni con maggiori quantità di polvere corrispondono alle aree luminose di Marte, note da lungo tempo agli osservatori.

La polvere dà origine a paesaggi che non hanno l'equivalente sulla Terra, come terreni fortemente butterati. Nel separarsi dall'atmosfera, essa cattura sostanze volatili e forma uno strato di ghiaccio ricco di polvere. In seguito, la componente volatile del ghiaccio si trasforma in gas, lasciando caratteristici incavi. È interessante il fatto che lo spessore di questo mantello di ghiaccio e polvere vari con la latitudine; in prossimità dei poli, come ha dimostrato Mars Odyssey, anche il 50 per cento del suolo fino a un metro di profondità potrebbe essere costituito da ghiaccio. Sui pendii, lo strato ghiacciato mostra segni di scorrimento viscoso, analoghi a quelli che caratterizzano i ghiacciai terrestri. Questo manto superficiale di Marte sta diventando oggetto di intense ricerche scientifiche.

In secondo luogo, il Pianeta Rosso è estremamente ventoso: su di esso l'attività eolica ha un'importanza paragonabile a quella che sulla Terra riveste l'azione dell'acqua meteorica. Le sonde hanno osservato tempeste di polvere estese a tutto il globo e colossali turbini e valanghe di polvere: tutti fenomeni generati dal vento. Le scie di polvere depositate sottovento rispetto agli ostacoli cambiano da stagione a stagione, probabilmente a causa di variazioni nel regime dei venti.

Dove non è coperta di polvere, la superficie marziana tipicamente mostra segni di erosione o di deposizione eolica. Tracce evidenti di erosione si osservano nei crateri, dai cui margini sembra sia stato asportato materiale, e negli *yardang*, creste nette e affilate prodotte dall'azione di sabbia trasportata dal vento. Fra i segni di deposizione si contano le coltri di sabbia e le dune mobili. Queste ultime sono composte da grani delle dimensioni di quelli della sabbia che si

Cortesia www.nirgal.net/schemas/schiaparelli-map.html (*pagina 1*); NASA/JPL/MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS MOC 2-320 (*pagina 2*); NASA/JPL/MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS MOC 2-259 (*pagina a fronte*)

spostano per saltazione, ossia compiendo «balzi» ripetuti sul terreno per impulso del vento. È necessaria una maggiore velocità del vento per sollevare direttamente la polvere che non per produrre la saltazione, sicché questo fenomeno spiega la maggior parte della polvere portata nell'atmosfera.

Sembra che l'attività eolica sia stata un fattore importante sin dall'epoca di massima craterizzazione, quando cioè il sistema solare era ancora giovane. Molte immagini mostrano crateri con gradi variabili di erosione: alcuni sono poco profondi e parzialmente colmati da depositi e dune di sabbia, mentre altri appaiono meglio conservati, più profondi e a forma di coppa. Michael Malin e Kenneth Edgett della Malin Space Science Systems di San Diego, la società di ricerca responsabile della videocamera di Mars Global Surveyor, hanno ricostruito una sequenza di processi, in cui parte della sabbia trasportata dal vento è stata intrappolata nei crateri già esistenti; altri crateri si sono formati in seguito. Dove e come possa essere stato prodotto un simile volume di sabbia e come sia stato trasportato attraverso l'atmosfera resta però un mistero.

I cieli tempestosi di Marte

Un terzo aspetto per cui Marte si distingue dalla Terra è la sorprendente varietà di cicli meteorologici e climatici; molti di essi sono simili a quelli terrestri, mentre altri ne differiscono radicalmente. Il giorno marziano è lungo più o meno quanto quello terrestre, ma l'anno marziano è pari a 687 giorni terrestri. L'inclinazione dell'asse di rotazione del Pianeta Rosso, che dà origine alle stagioni, è molto vicina a quella della Terra. Marte è privo delle precipitazioni e degli oceani che contribuiscono in maniera così fondamentale al clima terrestre. Ma la pressione atmosferica (inferiore all'1 per cento di quella terrestre) varia stagionalmente del 25 per cento circa; queste oscillazioni sono dovute a cicli di condensazione e sublimazione del ghiaccio di biossido di carbonio ai poli. Un'atmosfera così rarefatta ha una capacità termica molto bassa, sicché l'escursione di temperatura fra giorno e notte è superiore a 100 gradi Celsius. Le proprietà termiche dell'atmosfera sono influenzate in maniera drastica dalle particelle di polvere e ghiaccio in sospensione nell'aria. La conseguenza di tutto ciò è che, nonostante sia così rarefatta, l'atmosfera marziana possiede una dinamica e una circolazione complesse. Un'ipotetico «bollettino meteorologico» potrebbe prevedere forti venti, nubi di ghiaccio ad alta quota, nebbie in prossimità del suolo, gelate stagionali, turbini e grandi tempeste di polvere.

L'AUTORE

ARDEN L. ALBEE è responsabile scientifico della missione Mars Global Surveyor. È professore emerito di geologia e planetologia presso il California Institute of Technology e dal 1978 al 1984 ha diretto il settore scientifico del Jet Propulsion Laboratory della NASA. I suoi interessi di ricerca vanno dalla geologia sul campo all'analisi della composizione di rocce, meteoriti, comete e campioni lunari.

Come accade sulla Terra, i sistemi perturbati spesso partono dalle regioni polari settentrionali e si muovono a spirale verso latitudini più basse. Ma le tempeste di polvere più intense iniziano per lo più nel corso della primavera australe, quando il pianeta si riscalda rapidamente. Di tanto in tanto esse si fondono e giungono a circondare l'intero pianeta. Il Mars Global Surveyor ha seguito in particolare l'evoluzione di una tempesta di polvere globale della durata di quattro mesi iniziata nel giugno 2001. Contrariamente alle aspettative, non si trattava in realtà di una singola enorme tempesta, ma di un'aggregazione di diverse tempeste regionali. Malin ha paragonato l'effetto climatico della polvere sollevata da questo evento con quello dell'eruzione del Pinatubo, avvenuta sulla Terra nel 1991: un breve ma significativo episodio di raffreddamento.

Le calotte polari svolgono un ruolo chiave nei cicli dell'atmosfera. La loro forma ed estensione, ricavate dai rilevamenti topografici, indicano che esse sono prevalentemente costituite da ghiaccio d'acqua e non da biossido di carbonio congelato (il cosiddetto ghiaccio secco): quest'ultimo non è rigido come il ghiaccio d'acqua e non potrebbe mantenere la caratteristica forma a cupola. Un'osservazione nuova e importante è che lo strato di ghiaccio secco che ricopre per buona parte la calotta polare meridionale è in fase di veloce erosione. Chiaramente, questo processo non può proseguire a tempo indeterminato, né le sorgenti e i depositi di polvere possono conservarsi indefinitamente nello stato in cui li osserviamo oggi. Devono essere in atto altri fenomeni capaci di riciclare il ghiaccio e la polvere, forse legati alle variazioni orbitali. Malin ed Edgett hanno proposto che l'attuale regime dei venti possa essere meno intenso che in un passato abbastanza recente: un altro indizio del fatto che il clima marziano varia nel tempo.

Una quarta differenza sostanziale fra la Terra e Marte è il comportamento dell'acqua allo stato liquido. Alle condizioni attuali di temperatura e pressione l'acqua liquida è instabile alla superficie. Non può piovere; tuttavia il ghiaccio d'acqua sicuramente si mantiene a una certa profondità nel suolo marziano per tutto l'anno o per gran parte di esso. Su Marte, come sulla Terra, esistono diversi tipi di suoli poligonali che denunciano la presenza di notevoli quantità di ghiaccio nel terreno. Mars Odyssey ha rilevato ghiaccio superficiale esteso su gran parte del pianeta, tranne che nei pressi dell'equatore, e i modelli prevedono che il suolo debba essere congelato fino a notevoli profondità.

Occasionalmente, acqua allo stato liquido può raggiungere la superficie. Nel 2000 Malin ed Edgett hanno descritto solchi di aspetto recente che somigliano alle incisioni prodotte dai corsi d'acqua terrestri. Sull'onda dell'entusiasmo, vennero proposte le teorie più disparate per spiegare questa osservazione: fuoriuscite d'acqua da una falda (che inspiegabilmente avrebbe dovuto trovarsi ad alta quota sui margini di un cratere); geyser d'acqua pressurizzata; emissioni di biossido di carbonio gassoso ad alta pressione; sorgenti di calore vulcaniche in profondità. Infine, alcuni mesi fa, Philip Christensen della Arizona State University ha scoperto solchi simili a corsi d'acqua che chiaramente fuoriescono da sotto un banco di neve e ghiaccio. Ne ha concluso che queste strutture sono correlate ai cicli climatici marziani. Nei periodi più freddi, i pendii si ricoprono di uno strato di neve e polvere; la luce solare penetra in questo manto isolante e lo riscalda a sufficienza perché la neve fonda in profondità e l'acqua scorra lungo il pendio, creando incisioni. Nei periodi più caldi, la neve fonde o evapora totalmente, e i solchi sottostanti rimangono esposti.

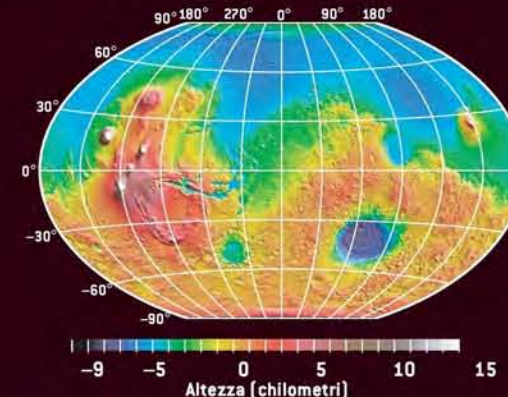
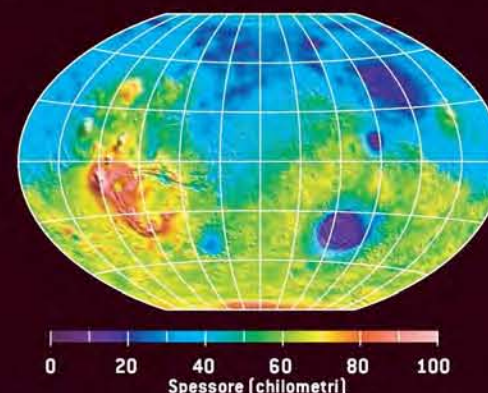
Strato su strato

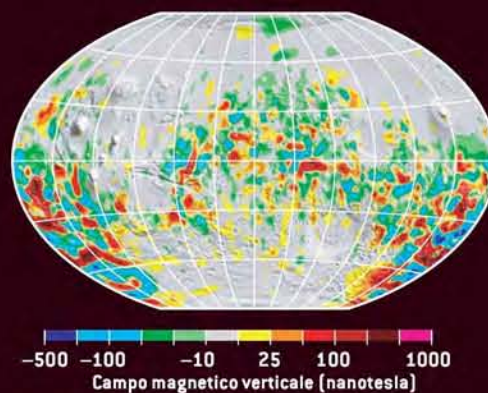
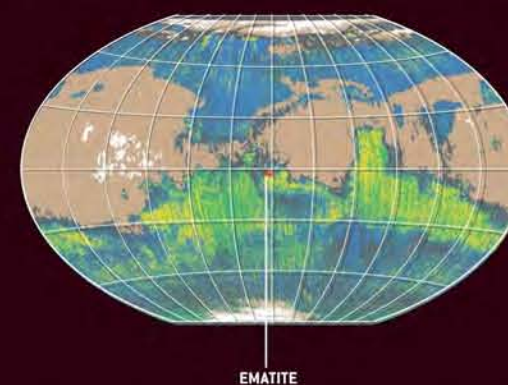
A dispetto dell'abbondanza d'acqua, però, Marte è arido. La sua mineralogia è quella di una superficie pressoché priva d'acqua. Sulla Terra, l'azione dell'acqua liquida calda produce suoli alterati, ricchi di quarzo, argille idrate e sali come carbonato e solfato di calcio. La sabbia di spiagge e dune è in gran parte costituita da quarzo. Su Marte, le sonde devono ancora evidenziare depositi di questi minerali. Le scure dune marziane so-

Mars Orbiter Laser Altimeter Science Team, Malin Space Science Systems (*mosaico in colori reali*); Oded Aharonson/California Institute of Technology (*tutti gli altri mosaici*); Fonte: Mars Odyssey Mission (*acqua*); Philip Christensen/Arizona State University (*geologia*); Mars Global Surveyor Mission (*tutti gli altri mosaici*)

IMMAGINI GLOBALI di MARTE

Siti di atterraggio: Cratere Gusev (1) Meridiani Planum (2), Isidis Planitia (3)

COLORI REALI Su Marte si distinguono quattro vaste regioni: l'emisfero meridionale fortemente craterizzato (con quelli che sembrano sistemi di valli fluviali), il più levigato emisfero settentrionale (con tracce di una antica linea di costa), la zona equatoriale (con vulcani e canyon giganteschi) e le calotte polari (con terreno molto mutevole e caotico). La mappa combina immagini a grande campo con dati altimetrici.

TOPOGRAFIA Il dislivello fra i bacini più profondi (*in blu scuro*) e i vulcani più alti (*in bianco*) raggiunge i 30 chilometri. Per confronto, sulla Terra il dislivello fra i punti più bassi e più elevati è solo di 20 chilometri. Il grande cerchio blu nell'emisfero meridionale corrisponde al Bacino Hellas, uno dei più grandi crateri d'impatto del sistema solare. Hellas è circondato da un ampio anello montuoso dell'altezza di circa 2000 metri.

SPESSORE CROSTALE Combinando la mappa topografica con misurazioni della gravità di Marte, si è potuto ricavare lo spessore della crosta marziana: circa 40 chilometri sotto le pianure settentrionali e 70 chilometri sotto gli altopiani dell'estremo sud. La crosta è particolarmente spessa (*in rosso*) sotto i giganteschi vulcani di Tharsis, e molto sottile (*in viola*) sotto il Bacino Hellas.

ACQUA Una tecnica di rivelazione neutronica indica la presenza di acqua nel suolo fino a un metro di profondità. L'energia dei neutroni prodotti quando la radiazione cosmica bombarda il suolo è assorbita dall'idrogeno nelle molecole d'acqua. Una carenza di neutroni di media energia è indicativa di un suolo ricco d'acqua (*in blu*). Secondo i calcoli, l'acqua presente basterebbe per formare un lago grande quanto la Bulgaria.

MAGNETISMO Marte non ha un campo magnetico globale, ma alcune aree della crosta hanno una magnetizzazione anche 10 volte più intensa di quella della crosta terrestre. Qui, rocce ricche di ferro sono diventate veri e propri magneti: ciò indica la presenza di un campo magnetico globale all'epoca in cui si solidificarono. Le fasce in senso est-ovest evocano strutture dovute alla tettonica delle zolle, ma la loro origine è ignota.

GEOLOGIA Le misurazioni spettrali nell'infrarosso permettono di distinguere vari tipi di rocce. Il basalto (*in verde*), una roccia vulcanica poco alterata, predomina nell'emisfero sud. L'andesite (*in blu*) sembra comune nelle zone settentrionali. Presso l'equatore vi è un affioramento di ematite (*in rosso*), un minerale tipicamente prodotto in presenza di acqua. In ampie zone, la polvere (*in bruno chiaro*) o le nubi (*in bianco*) non permettono l'esame.

no basaltiche, costituite soprattutto da minerali come pirosseno e plagioclasio, che sulla Terra verrebbero alterati rapidamente. Ne consegue che le attuali condizioni atmosferiche fredde e secche devono essersi instaurate precocemente nella storia del pianeta.

Marte è sempre stato così diverso dalla Terra? Al di sotto delle coltri di sabbia e polvere vi sono numerosi indizi delle trasformazioni subite dal Pianeta Rosso nel corso del tempo. In primo luogo, si nota una sorprendente disparità fra l'emisfero settentrionale e quello meridionale. Quest'ultimo è a quota elevata e fortemente craterizzato (indizio di una superficie antica); quello settentrionale è un vasto bassopiano con pochi crateri (e quindi deve essere più recente). Fra i due vi è l'immensa regione dei Monti Tharsis, di età intermedia e culminante in vulcani altissimi rispetto alle montagne della Terra. Applicando a queste vette i nuovi dati ad alta risoluzione, James W. Head III della Brown University ha evidenziato strutture di flusso che assomigliano in modo straordinario a ghiacciai di alta montagna, e che potrebbero indicare la presenza di ghiaccio sotto una coltre di roccia e polvere.

I bassopiani settentrionali sono straordinariamente piatti, e questa loro caratteristica ha portato a ipotizzare che siano stati fondi lacustri per un periodo significativo della storia marziana. A quanto pare, sono ricoperti da molteplici strati di colate vulcaniche e di sedimenti originatisi in aree più a sud. Nuove mappe topografiche dettagliate hanno rivelato la presenza di «crateri fantasma»: lievi depressioni circolari, evidentemente parte di una antica superficie craterizzata che è stata sepolta da un sottile strato di depositi più recenti.

Lungo il margine degli altipiani meridionali si osservano strutture che possono essere state prodotte solo da acqua allo stato liquido. Queste incisioni del terreno sono colossali rispetto alle loro controparti terrestri: se il famoso canyon chiamato Valles Marineris si trovasse sul nostro pianeta, si estenderebbe in lunghezza per una distanza superiore a quella fra Lisbona e Mosca e in larghezza per una distanza pari a quella fra Milano e Rimini; e sarebbe un abisso davvero impressionante, profondo quasi una volta e mezza l'altezza del Cervino. Sulla Terra non esiste nulla di lontanamente paragonabile. Il terreno caotico rilevato alla sua testata fa pensare che l'acqua vi scorresse non con un flusso costante, ma in ondate concentrate e catastrofiche, capaci di devastare ogni cosa sul loro percorso. Altri canali di flusso marziani mostrano caratteristiche simili. Dato che queste strutture si trovano nei Monti Tharsis, devono avere un'età intermedia fra i terreni dell'emisfero nord e quelli dell'emisfero sud.

Isole modellate dalla corrente e altre caratteristiche di questi canali rimandano ai terreni denudati del Nord-ovest americano, prodotti verso la fine dell'ultima glaciazione, circa 10.000 anni fa, quando un lago di dimensioni paragonabili a uno dei Grandi Laghi spezzò la sua diga di ghiaccio e si svuotò nel giro di pochi giorni. Su Marte sono state riconosciute tracce di calamità analoghe, ma 10-100 volte più devastanti. È possibile che siano state provocate da sorgenti di calore vulcanico o dal flusso termico generale dall'interno del pianeta. Il calore avrebbe fuso il ghiaccio sottostante lo spesso strato di permafrost e la pressione si sarebbe accumulata a livelli elevatissimi, fino a che l'acqua non fosse riuscita a erompere con violenza all'esterno.

Le più discusse fra le strutture associate all'acqua sono i sistemi di valli. Visibili su tutta l'estensione degli altopiani meridionali, essi hanno un andamento ramificato, dendritico, che ricorda quello dei fiumi terrestri e fa pensare che queste strutture siano state formate da corsi d'acqua superficiali alimentati da pioggia o neve. Sono l'indizio più suggestivo del fatto che Marte potesse essere un tempo caldo come la Terra.

Tuttavia il loro aspetto differisce da quello dei fiumi alimentati dalle piogge sul nostro pianeta; assomigliano piuttosto ai sistemi fluviali delle aree desertiche, che sono generati dalla lenta risalita di acqua da sorgenti sotterranee. Questi corsi d'acqua tipicamente hanno origine in ripidi anfiteatri di roccia anziché essere alimentati da un sistema di piccoli tributari. Un acceso dibattito scientifico ruota intorno a una questione cruciale: esisteva la pioggia su Marte in epoca primordiale?

PASSEGGIARE SU MARTE

Tre nuove missioni sono appena partite verso Marte, due della NASA e una dell'ESA. Questi veicoli, che dovrebbero giungere a destinazione nel prossimo gennaio, saranno geologi robotici: il loro compito sarà quello di studiare la storia geologica dei siti di arrivo, indagare le eventuali tracce lasciate dalla presenza di acqua e stabilire fino a che punto le passate condizioni ambientali fossero adatte per la vita. (Una descrizione molto più estesa delle due missioni si trova sul numero 418, giugno 2003, di «Le Scienze».)

I due rover della NASA meritano una citazione particolare in quanto godranno di una mobilità senza precedenti. Ciascuno è in grado di spostarsi di 100 metri al giorno; si ricordi, per confronto, che il rover Sojourner del Mars Pathfinder, nel 1997, percorse 100 metri nel corso dell'intera missione. Un sostegno di circa 1,5 metri di altezza regge una videocamera binoculare e uno spettrometro per lo studio dell'emissione termica, uno dei molti strumenti capaci di analizzare la composizione dei materiali. Un braccio robotico reca gli altri strumenti: uno spettrometro Mössbauer, un rivelatore di particelle alfa, uno spettrometro per raggi X e un microscopio. Il braccio è dotato anche di una sorta di mola, destinata a ripulire le superfici rocciose da studiare. Un'antenna a disco invia i segnali direttamente alla Terra e un'altra antenna li trasmette attraverso l'orbiter di Mars Global Surveyor o di Mars Odyssey.

La scelta dei siti di atterraggio è stata fatta in base ai dati forniti dagli orbiter. Se la scelta dei siti per le missioni Viking del 1976 fu compiuta da pochi responsabili in base più che altro all'istinto, questa volta ci sono state lunghe consultazioni con decine di scienziati e ingegneri. Mettendo sui due piatti della bilancia le strutture geologiche più promettenti (come quelle che si ritengono correlate all'azione dell'acqua) e i possibili pericoli (ripidi pendii e forti venti), l'elenco iniziale di oltre 150 siti è stato ridotto a 7, poi a 4 e infine, l'11 aprile, a 2: il cratere Gusev, i cui depositi stratificati potrebbero essere i sedimenti di un fondo lacustre, e Meridiani Planum, una zona ricca di ematite a grani grossolani: un minerale che tipicamente si forma in associazione con l'acqua liquida. Il lander europeo Beagle 2, dal canto suo, scenderà su Isidis Planitia, che potrebbe essere un bacino sedimentario.

NASA Artist Concept/Mars Exploration Program

NELLE PIANURE A NORD-OVEST DI OLYMPUS MONS, turbini di polvere si lasciano alle spalle lunghe scie (*a destra*). Scene simili si sono svolte nel Bacino Argyre (*qui sotto*) e a est di Valles Marineris (*in basso*), dove un turbine è stato visto in azione. Questi vortici simili a tornado - che si ritiene siano dovuti all'innalzamento di aria calda dalla superficie - asportano la sabbia di colore chiaro e mettono allo scoperto terreno relativamente scuro. Si tratta di uno dei molti processi eolici che continuamente rimodellano la superficie di Marte. L'immagine a destra è stata ottenuta da Mars Odyssey, mentre le due sottostanti sono di Mars Global Surveyor.

NASA/Arizona State University Themis Science Team, February 6, 2003 (*a destra*); NASA/JPL/Malin Space Science Systems MOC 2-220 (*a sinistra in alto*) e MOC 2-318 (*a sinistra in basso*)

OCCHI SU MARTE

Sia Mars Global Surveyor sia Mars Odyssey orbitano intorno al pianeta passando sopra entrambi i poli. Le loro orbite rimangono fisse mentre Marte ruota sotto di loro, permettendo agli strumenti di osservare giorno e notte strisce della superficie dell'intero pianeta. Questa copertura continua consente di tenere sotto controllo i cambiamenti a livello di superficie, atmosfera, gravità e campo magnetico.

Il Global Surveyor ha cinque strumenti principali. Il suo altimetro laser ha misurato la forma globale e la topografia di Marte con una precisione in altezza di circa 5 metri: ciò significa che il Pianeta Rosso è oggi cartografato più accuratamente di gran parte della Terra. La videocamera ottiene immagini a media risoluzione nel rosso e nel blu dell'intera superficie, nonché immagini ad alta risoluzione - 1,4 metri per pixel, più o meno come le fotografie riprese dai satelliti spia degli anni cinquanta - di aree limitate. Un interferometro Michelson misura lo spettro dell'emissione infrarossa termica con elevata risoluzione spettrale ma bassa risoluzione spaziale, adeguata per cartografare la composizione minerale e le proprietà termiche della superficie. Un magnetometro determina il campo magnetico. Infine, la sonda stessa rappresenta uno strumento, in quanto il suo moto è sensibile alle variazioni della gravità marziana. Il campo gravitazionale rivela lo spessore della crosta e i cambiamenti nelle dimensioni delle calotte polari.

Odyssey completa le misurazioni eseguite da Global Surveyor. La sua videocamera non può funzionare ad alta risoluzione, ma ottiene immagini in cinque bande selezionate di colore. Il suo strumento per l'infrarosso ha bassa risoluzione spettrale ma alta risoluzione spaziale. Un altro apparecchio misura i flussi di raggi gamma e neutroni, che sono sensibili alla presenza di idrogeno appena sotto la superficie; Odyssey è quindi la prima sonda in grado di spingere lo sguardo entro Marte, fino a circa un metro di profondità.

Entrambe le sonde studiano anche l'atmosfera, compiendo ogni giorno osservazioni dell'intero pianeta, allo stesso modo dei satelliti meteorologici in orbita intorno alla Terra. Dodici volte al giorno lo spettrometro per l'emissione termica misura temperatura, pressione, copertura nuvolosa e quantità di polvere. Inoltre le trasmissioni radio vengono diffratte nel passare attraverso l'atmosfera di Marte; l'elaborazione dei segnali permette di ricostruire le variazioni di temperatura e pressione con la quota.

MARS GLOBAL SURVEYOR (rappresentazione artistica)

NASA Artist Concept/Mars Exploration Program

La cronologia dei sistemi di valli potrebbe essere la chiave della loro interpretazione. Studi recenti e dettagliati del margine settentrionale degli altipiani indicano che enormi quantità di materiale vennero erose durante - e non dopo - l'intenso bombardamento meteoritico avvenuto nelle prime fasi della storia marziana.

Queste analisi implicano che la distribuzione dell'acqua continuò a cambiare, via via che gli impatti rimodellavano il paesaggio. I crateri si riempirono di acqua e detriti, e canali cominciarono a riunirli in una rete; ma la caduta delle meteoriti continuava a perturbare questo processo. Per esempio, il Bacino Argyre, che ha un diametro di 1000 chilometri, un tempo poteva essere colmo d'acqua. Esso fa parte di un sistema di valli che trasportava acqua dalle vicinanze del Polo sud, attraverso il bacino stesso, fino a canali che attraversavano l'equatore. Il ruolo dell'acqua e del ghiaccio in questi sistemi, sia in superficie sia nel sottosuolo, è ancora poco chiaro. In ogni caso essi differiscono marcatamente dall'idrografia terrestre.

Un ultimo indizio sulla storia marziana è fornito da una delle scoperte più sorprendenti di Mars Global Surveyor, vale a dire l'estensione dei depositi stratificati negli strati più superficiali della crosta. Quasi ovunque, dove sono esposti - sulle pareti di canyon, crateri, tavolati e valli - i livelli sottostanti alla superficie appaiono stratificati. Gli strati differiscono l'uno dall'altro per spessore, colore e resistenza agli agenti atmosferici, e dimostrano che la superficie marziana è andata incontro a sequenze complesse di deposizione, formazione di crateri ed erosione. Gli strati più antichi sono i meglio conservati, mentre quelli recenti sono stati asportati parzialmente, a quanto pare dal vento.

Da dove vengono questi strati? L'assenza di blocchi massicci porta a escludere che si tratti di colate laviche, sebbene possano essere formati da ceneri vulcaniche. Tuttavia è probabile che la maggior parte degli strati sia composta da detriti sollevati dagli impatti. Sulla Luna sono stati osservati anelli di detriti da impatto che si incrociano e si sovrappongono, contrassegnando crateri di età differenti. Considerato che Marte è fortemente craterizzato si può pensare che gli strati superficiali della sua crosta siano stati massicciamente disgregati e rimescolati; acqua e vento devono avere poi disperso questo materiale.

Un Marte azzurro?

In un certo senso, le idee sull'aspetto che Marte aveva in epoca primordiale non sono mai state meno chiare di adesso. L'incertezza è particolarmente evidente quando si affronta il problema dell'acqua allo stato liquido. La presenza o l'assenza di acqua liquida è cruciale per i processi geologici, i cambiamenti climatici ed eventualmente lo sviluppo della vita. Gli antichi sistemi di valli e i più tardi canali di flusso indicano che un tempo l'acqua doveva essere abbondante. Se allora esistevano piogge, l'atmosfera doveva essere molto più densa. Ma le sonde non hanno trovato traccia di depositi di minerali carbonatici, che dovrebbero essere un prodotto inevitabile di una atmosfera densa ricca di biossido di carbonio.

Al momento si considerano tre ipotesi. Forse l'atmosfera primordiale era davvero densa, e Marte poteva avere laghi, e persino oceani, liberi dal ghiaccio. Robert A.

LA «ROCCIA BIANCA» scoperta dalla sonda Viking negli anni settanta (*nel riquadro*) è un esempio di come la somiglianza di Marte con la Terra possa essere ingannevole. Questa struttura assomiglia incredibilmente a un deposito salino lasciato da acqua allo stato liquido. Ma le misurazioni spettrali hanno mostrato che si tratta di normale polvere compattata o cementata. La polvere rossastra ha sepolto strutture come il cratere in alto a destra, ed è stata a sua volta ricoperta da sabbia nera. L'immagine, ottenuta da Mars Global Surveyor, rivela una sequenza complessa di eventi geologici.

BIBLIOGRAFIA

ALBEE ARDEN L., *Mars 2000*, in «Annual Review of Earth and Planetary Sciences», 28, pp. 281-304, 2000.

SHEEHAN WILLIAM e O'MEARA STEPHEN JAMES, *Mars: The Lure of the Red Planet*, Prometheus Books, 2001.

MALIN MICHAEL C. ed EDGETT KENNETH S., *The Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera: Interplanetary Cruise through Primary Mission*, in «Journal of Geophysical Research», 106, n. E10, pp. 23429-23570, 25 ottobre 2001.

Nature Insight: Mars, sezione speciale di «Nature», 412, pp. 207-253, 12 luglio 2001.

Per informazioni sulle varie missioni verso Marte:
www.jpl.nasa.gov (missioni della NASA)
sci.esa.int/marsexpress (missione Mars Express dell'ESA)
www.isas.ac.jp/e/enterp/missions/index.html (missione giapponese Nozomi)

Craddock del National Air and Space Museum e Alan D. Howard dell'Università della Virginia hanno ipotizzato che il biossido di carbonio sia sfuggito nello spazio o sia rimasto intrappolato in carbonati finora sfuggiti all'individuazione. È interessante il fatto che gli spettri ottenuti da Mars Odyssey abbiano rivelato piccole quantità di carbonati nella polvere.

In alternativa, forse Marte possedeva un'atmosfera assai rarefatta ed era un mondo gelido. Qualunque corpo idrico esistente doveva essere coperto di ghiaccio. Potevano esservi nevicate che rifornivano le falde sotterranee e davano origine a ruscelli temporanei in superficie. Steven M. Clifford del Lunar and Planetary Science Institute di Houston, fra gli altri, ha ipotizzato che anche la fusione degli strati più profondi di un ghiacciaio o di uno strato molto spesso di permafrost potesse essere un processo in grado di ripristinare le falde sotterranee. Nonostante il clima estremamente freddo, sporadici periodi di temperature più calde potrebbero aver sostenuto la dinamica del pianeta. Questi cicli climatici sarebbero stati determinati da variazioni orbitali simili a quelle che producono le glaciazioni sulla Terra. Head, John F. Mustard della Brown University e altri hanno fatto notare che la dipendenza dalla latitudine della copertura di ghiaccio e di polvere sarebbe una prova di cambiamenti climatici.

Nell'ultimo scenario plausibile, i cicli climatici non sarebbero bastati per rendere Marte sufficientemente caldo da possedere acqua allo stato liquido. Il pianeta avrebbe conosciuto condizioni miti solo per brevi periodi, dopo gli impatti più grandi. Ciascuno di essi può aver depositato materiali idrati e immesso in atmosfera abbastanza calore e acqua per consentire la formazione di piogge. Ben presto, però, il pianeta era destinato a tornava alle normali, rigide condizioni climatiche. Victor Baker dell'Università dell'Arizona ha sostenuto che un vulcanismo intenso come quello documentato dalla regione dei Monti Tharsis doveva periodicamente rendere Marte un pianeta decisamente temperato.

È anche possibile che nessuna di queste ipotesi sia corretta. Semplicemente, non abbiamo abbastanza informazioni sui primordi di Marte per comprendere realmente quale poteva essere il suo clima. Per questo dobbiamo attendere le future esplorazioni. Al contrario della Terra, il Pianeta Rosso ha conservato gran parte del suo paesaggio antico, che potrebbe fornire indizi sulle condizioni nelle quali si è formato. Anzi, comprendere come mai Marte sia diventato così diverso dalla Terra aiuterà i geologi a decifrare meglio la storia del nostro stesso pianeta.

Costruire cellule artificiali

LE PROTOCELLULE, minuscoli contenitori formati da straterelli lipidici in grado di trattenere al loro interno piccole molecole, si formarono probabilmente in acque costiere basse e agitate. La fotografia in questa pagina mostra Shark Bay, in Australia occidentale, un tempo l'habitat di alcune delle forme di vita più antiche attualmente conosciute, i cianobatteri. Le colonie di questi microrganismi vissuti tra i 2 e i 3 miliardi di anni fa si sono conservate sotto forma di caratteristiche masse calcaree denominate stromatoliti.

Modelli relativamente semplici delle complesse strutture biologiche si stanno rivelando strumenti molto utili per comprendere le funzioni elementari della vita

di Alberto Diaspro, Daniela Silvano, Silke Krol, Ornella Cavalleri e Alessandra Gliozzi

John Reader/Science Photo Library/Grazia Neri

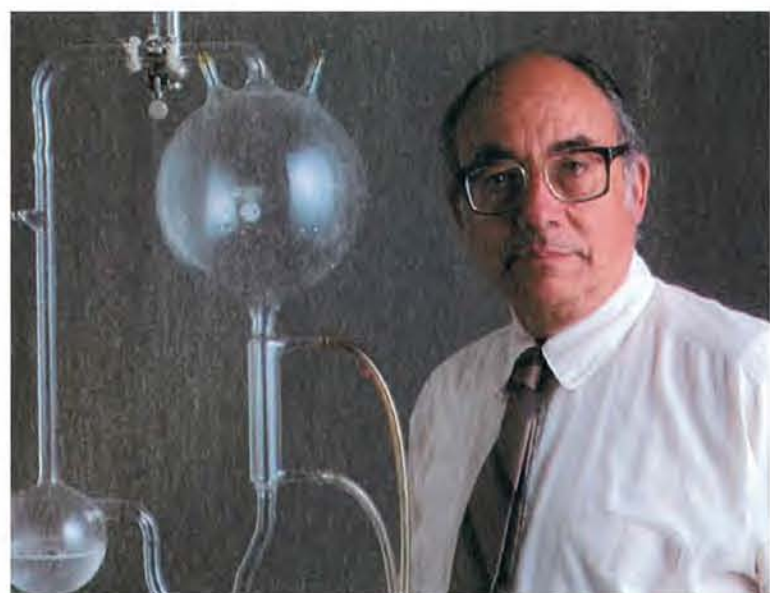
Come si sono formate le prime rudimentali forme di vita sulla Terra? La domanda acquista un significato centrale anche per capire dove e quanto diffusamente la vita possa essersi originata in altre parti dell'universo, ma non trova una facile risposta. Una sperimentazione in laboratorio sulla formazione delle primitive forme di vita è necessariamente limitata nel tempo e quindi non può che dare un'idea molto approssimativa di quello che è accaduto durante le centinaia di milioni di anni in cui questo processo si è sviluppato. Sono ben noti gli esperimenti compiuti nel 1953 dal chimico Harold Clayton Urey e dal suo specializzando Stanley L. Miller i quali, sottoponendo a intense scariche elettriche una miscela gassosa di composizione presumibilmente analoga a quella dell'atmosfera primordiale, ottennero molecole organiche e, in particolare, amminoacidi.

Kevin Walsh

STANLEY L. MILLER accanto a una copia dell'apparecchio utilizzato nel 1953 per eseguire il suo famoso esperimento che dimostrava come gli amminoacidi si sarebbero potuti formare nel «brodo» primordiale.

Si dimostrava così come le scariche elettriche che si generavano in condizioni naturali durante le tempeste nell'atmosfera primordiale possano aver prodotto le molecole prebiotiche. Questi esperimenti fornivano un potente supporto empirico alla teoria dell'evoluzione chimica sviluppata dal russo Aleksandr I. Oparin negli anni venti e, indipendentemente, dall'inglese John B. S. Haldane negli anni trenta. Vi sono tuttavia due questioni fondamentali da affrontare. La prima richiede di comprendere come polimeri giganti essenziali alla vita, in particolare proteine e acidi nucleici, abbiano potuto sintetizzarsi in condizioni naturali, senza l'aiuto di catalizzatori. Le teorie correnti sono concordi nel ritenere che la vita si sia sviluppata negli oceani primitivi. Ma come è possibile che in distese così sterminate molecole semplici si siano incontrate casualmente e abbiano dato luogo a strutture complesse quali acidi nucleici, proteine o più semplicemente polimeri organici? La probabilità che ciò avvenga è certamente tanto bassa da rendere l'ipotesi inverosimile. Nel 1947 John D. Bernal suggerì che le molecole primitive si sarebbero concentrate nelle lagune e nelle pozze formate dalle maree intorno agli oceani: i materiali argillosi che vi erano contenuti avrebbero agito sia come stampi, per adsorbire le molecole e favorirne la polimerizzazione, sia come schermi contro i raggi ultravioletti. Attualmente si ritiene che tali molecole fossero capaci di autoreplicarsi, fossero quindi precursori dell'RNA o del DNA.

Prima il contenitore, poi il contenuto

Si ritiene che lo sviluppo della vita sulla Terra abbia avuto luogo con la creazione di sistemi che permettessero il confinamento spaziale di elementi per aumentarne la probabilità di incontro e di reazione. Già nel 1932 erano stati creati in laboratorio contenitori organici primitivi, i coacervati, proposti come precursori delle membrane cellulari. Sidney Fox, un ricercatore americano recentemente scomparso, iniziò negli anni cinquanta esperimenti volti a dimostrare come gli amminoacidi (i mattoni che costituiscono le proteine) possano organizzarsi spontaneamente in microsferule, che egli e i suoi allievi utilizzarono come modello sperimentale delle cellule primitive.

L'ipotesi proposta da R. J. Goldacre nel 1958 e ripresa qualche anno dopo da Melvin Calvin ci sembra più realistica. Secondo questi autori i microcontenitori in grado di confinare nel loro interno acquoso molecole biologiche o loro precursori furono membrane lipidiche. I lipidi, costituenti fondamentali delle membrane biologiche, sono molecole anfipatiche, cioè dotate di una doppia natura, idrofila e idrofoba. Queste molecole formano sull'acqua strati monomolecolari in cui la porzione idrofila della molecola è immersa nell'acqua, mentre quella idrofoba è rivolta verso l'aria. Se la superficie dell'acqua ricoperta da tale strato viene agitata, per esempio da un moto ondoso, possono formarsi microsferule, liposomi o vescicole. Un'idea interessante è che queste vescicole, lasciando passare al loro interno piccole molecole di precursori delle macromolecole biologiche e bloccando al loro interno i polimeri che eventualmente si fossero formati, potrebbero aver svolto, nell'oceano primitivo, le funzioni di protocellula.

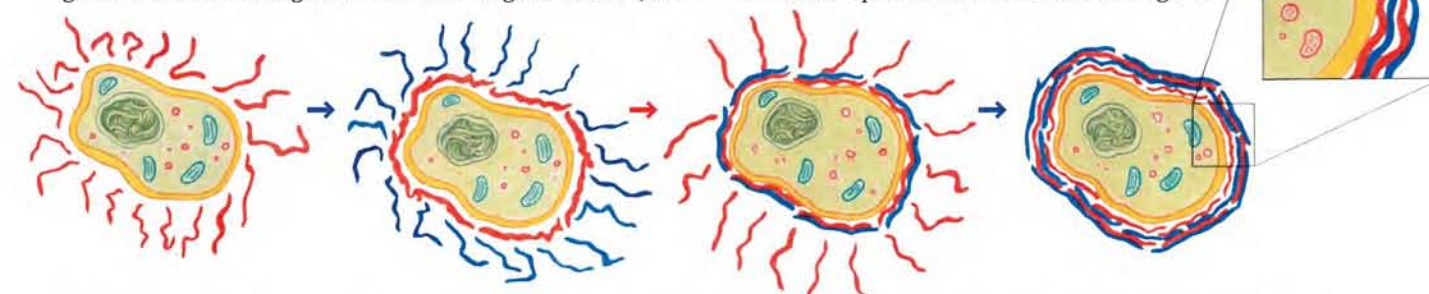
Tuttavia, questa brillante ipotesi non fu mai avvalorata da dati sperimentali. Infatti, mentre i liposomi si rivelarono un aiuto formidabile per riprodurre in laboratorio caratteristiche importanti dei complessi sistemi che regolano i flussi (di materia, di energia e di informazione) fra interno ed esterno della cellula, non fu possibile utilizzarli per studi sull'origine della vita a causa della fragilità meccanica che li rende inadatti a costituire la barriera spaziale entro cui avvengono i processi di polimerizzazione indotti da scariche elettriche o da radiazioni ultraviolette o ionizzanti.

Verso la fine degli anni novanta, al Max-Planck-Institut per i colloidi e le interfacce di Golm (Berlino) diretto da Helmuth Möhwald, sono state realizzate strutture polimeriche consistenti in gusci sferici immersi in acqua e, a loro volta, contenenti uno spazio centrale acquoso. Queste strutture, denominate nanocapsule, hanno aperto la via a un vasto campo di ricerca sia fondamentale sia applicativa. Esse, infatti, offrono un microambiente confinato e protetto in cui possono essere inseriti acidi nucleici in grado di esprimere proteine. L'intero sistema, formato dunque da una membrana che racchiude acidi nucleici e proteine, è un ottimo modello di protocellula.

IN SINTESI

- È probabile che la comparsa della vita sulla Terra sia legata alla formazione di microsfere rivestite da uno strato molecolare in grado di proteggere il contenuto.
- Questa semplice strategia, dimostratasi vincente, è stata seguita anche in laboratorio, consentendo di ottenere modelli di membrana molto utili come i liposomi, ampiamente utilizzati per veicolare farmaci o altre sostanze.
- Un ulteriore passo avanti è rappresentato dalle nanocapsule, sfere formate da un rivestimento di polielettroliti, più resistenti e adattabili dei liposomi e in grado di veicolare non solo farmaci, ma anche un'intera cellula, senza suscitare reazioni da parte del sistema immunitario.

Dai modelli di membrana alle cellule artificiali

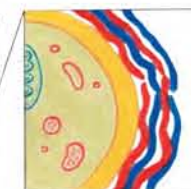
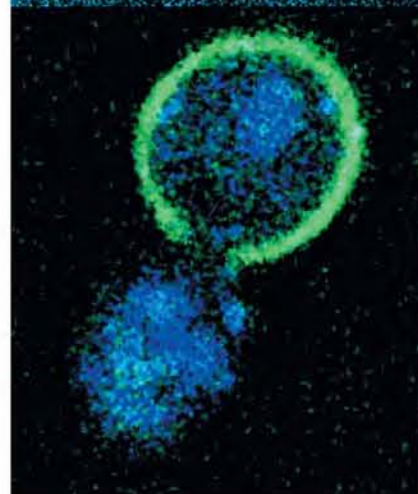
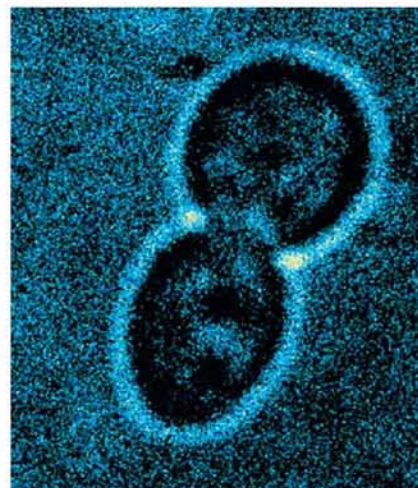
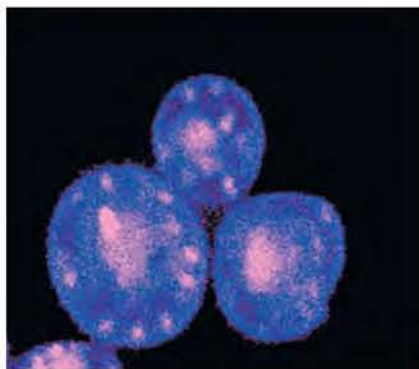
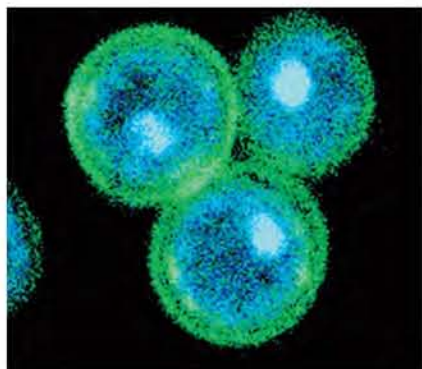
L'evoluzione delle conoscenze sui sistemi viventi ha spesso fatto ricorso a sistemi di laboratorio che riproducano particolari aspetti dei complessi e delicati meccanismi biologici o evolutivi. Fin dai primi decenni del secolo scorso si è tentato di mettere insieme sistemi molecolari come tanti pezzetti di Lego che imitassero alcuni aspetti caratteristici della macchina cellulare e in particolare della membrana cellulare. Quest'ultima è una vera e propria officina, sede di innumerevoli funzioni, dal riconoscimento immunitario, al trasporto di materia fra interno ed esterno della cellula, alla capacità di catturare, immagazzinare e usare energie e di convertire segnali esterni (luminosi, odorosi, tattili) in informazioni utili per il sistema nervoso centrale.

Le strategie seguite per ottenere in laboratorio membrane biomimetiche sono molteplici. Esse hanno permesso di realizzare sistemi di grandissimo interesse e utilità scientifica: la costruzione di monostrati lipidici, la formazione di membrane lipidiche planari e di liposomi, la fabbricazione di film costituiti da una successione ordinata di monostrati (denominati di Langmuir-Blodgett, dal nome dei due studiosi che li realizzarono per primi) e infine la costruzione di nanosistemi realizzati spontaneamente attraverso l'ancoraggio di uno strato monomolecolare a un supporto solido. Tutti questi sistemi modello costituiscono uno strumento formidabile di indagine per studiare in ambiente controllato i sofisticati meccanismi che regolano le interazioni fra le diverse molecole biologiche e i processi di scambio fra interno ed esterno della cellula. Va inoltre ricordato che molti di questi sistemi costituiscono la base di partenza per studi su biosensori e su applicazioni di nanobiotecnologia.

I liposomi presentano un secondo aspetto applicativo particolarmente rilevante: la possibilità di soccorrere le cellule in difficoltà, o uccidere le cellule nocive, in particolare quelle tumorali. È infatti possibile caratterizzare la loro superficie mediante opportune etichette, in modo che essi riconoscano le cellule bersaglio e solo a queste rilascino i farmaci inseriti al loro interno. In questo modo vengono minimizzati gli effetti tossici sulle cellule sane. Tuttavia la difficoltà principale per un pieno successo di queste applicazioni è dovuta alla già ricordata fragilità dei liposomi.

Alle soglie del 2000 è stata proposta una nuova e rivoluzionaria tecnologia, basata sempre sul concetto di autoassemblaggio, che sfrutta tuttavia altri soggetti molecolari: i polielettroliti, lunghe catene molecolari, costituite da identici «mattoncini» (i monomeri) dotati di cariche elettriche che variano di numero a seconda delle condizioni della soluzione in cui sono immersi. Nel 1997 un articolo pubblicato sulla rivista «Science» descriveva una procedura atta a costruire sistemi ordinati depositando strato per strato polielettroliti carichi positivamente e negativamente in modo alternato e quindi stabilizzati da attrazioni elettrostatiche. Prendendo spunto da questo lavoro, il gruppo guidato da Möhwald proponeva la costruzione di «gusci» di polielettroliti che denominava appunto nanocapsule.

Questa brillante idea costituisce una sfida importante per la costruzione di cellule artificiali. Le nanocapsule possono infatti essere rivestite da un doppio strato lipidico e costituire ottimi modelli di cellule, nelle quali la struttura interna dei polielettroliti rappresenterebbe l'impalcatura della cellula o citoscheletro.

Come i liposomi, le nanocapsule possono anche essere caratterizzate in modo da veicolare selettivamente i farmaci verso bersagli specifici, costituendo cioè quella classe di farmaci intelligenti

IL PROCESSO DI RIVESTIMENTO POLIMERICO di uno stampo (*pagina a fronte*) o di una cellula avviene per deposizione alternata di polielettroliti di carica opposta. Per ottenere una nanocapsula lo stampo viene rimosso variando l'acidità della soluzione: il compartimento ottenuto può poi contenere farmaci.

CELLULE RICOPERTE marcate con sonde fluorescenti; a sinistra si può osservare lo strato polimerico intorno alle cellule (*in verde*) e la distribuzione del DNA nucleare e mitocondriale al loro interno (*in azzurro*). Al centro, la colorazione fuchsia sovrapposta alla sagoma della cellula (*in blu*) ne testimonia la vitalità dopo l'incapsulamento. A destra in basso, una cellula ricoperta in duplicazione. La fluorescenza permette di distinguere tra cellula madre (*ricoperta dallo strato verde*) e cellula figlia. Sopra, un'immagine convenzionale ottenuta con il microscopio a trasmissione.

GLI AUTORI

ALBERTO DIASPRO è docente di fisica e biofisica presso il Dipartimento di fisica dell'Università di Genova. SILKE KROL ha ottenuto il dottorato di ricerca in biochimica alla Westfälische Wilhelms-Universität di Münster, in Germania. Attualmente ha un contratto di ricerca sul Progetto europeo «Nanocapsule». ORNELLA CAVALLERI ha ottenuto il dottorato di ricerca in fisica all'Institut de Physique Expérimentale del Politecnico di Losanna. Attualmente è ricercatrice al Dipartimento di fisica dell'Università di Genova. DANIELA SILVANO, laureata in fisica, sta svolgendo il dottorato di ricerca presso il Laboratoire de Chimie Physique des Polymères et des Membranes del Politecnico di Losanna. ALESSANDRA GLIOZZI è professore ordinario di fisica biologica al Dipartimento di fisica dell'Università di Genova, dove dirige un gruppo di ricerca in biofisica. È inoltre direttore della Sezione biofisica dell'INFM.

che è un obiettivo avanzato della moderna terapia. Molti studi si stanno sviluppando in questa direzione e il loro successo costituirà indubbiamente una svolta fondamentale nella cura di molte malattie.

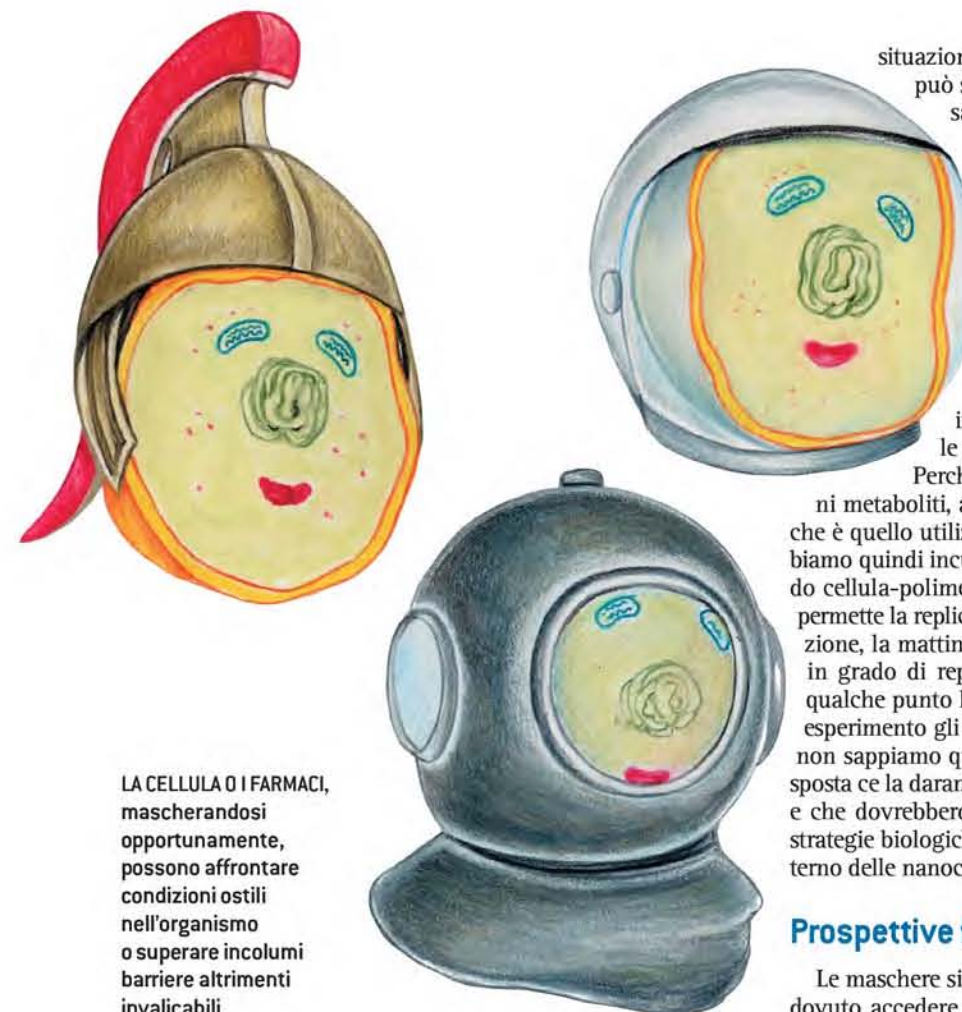
Fabbricare una nanocapsula

Alla base della costruzione delle nanocapsule c'è l'idea che la deposizione strato per strato di polielettroliti non debba necessariamente avere come supporto una superficie piana, ma possa realizzarsi su sferette o anche su minuscoli cristalli non più grandi di un granellino di sale da cucina. È così possibile far avvenire la deposizione su oggetti le cui dimensioni possono variare dallo spessore di un capello (intorno al decimo di millimetro) fino a quelle di un virus (cioè un centinaio di nanometri). Questi oggetti, che fungono da stampi, possono successivamente venire disciolti, per esempio cambiando l'acidità (o *p*H) della soluzione acquosa in cui sono dispersi.

Si ottiene così una dispersione acquosa di gusci di nanocapsule, la cui parete, anziché essere costituita da un doppio strato lipidico come nei liposomi, è formata da più strati di polielettroliti. La denominazione di nanocapsula assume un duplice valore: non solo significa che si può scendere fino al livello del centinaio di nanometri nelle dimensioni delle capsule, ma anche che l'organizzazione della superficie può essere modulata a livello nanometrico.

Ecco dunque come è possibile ottenere per autoassemblaggio nuove microsferule che hanno il pregio di essere robuste dal punto di vista meccanico, stabili nel tempo e di dimensioni che possono essere fatte variare in maniera controllata. A questo si aggiunga la grande varietà di polielettroliti (anche dotati di biocompatibilità) che possono essere selezionati per la loro fabbricazione.

La costruzione di nanocapsule polimeriche ha dato luogo a un progetto dell'Unione Europea a cui il nostro gruppo di lavoro è stato invitato ad aderire. Il progetto intendeva valorizzare in pieno questa scoperta utilizzando le nanocapsule non solo come veicolo intelligente di farmaci, ma anche come vettore dell'intera potenzialità di una cellula nel produrre e rilasciare molecole. Ci si è quindi chiesti perché non inserire direttamente un'intera cellula all'interno di una nanocapsula, sfruttando così la sofisticata macchina biologica che l'evoluzione aveva già selezionato. Così «mascherata» la cellula potrebbe eludere gli attacchi del sistema immunitario ed essere veicolata dove occorre, come un moderno, minuscolo cavallo di Troia.

Ma le cellule saranno in grado di sopravvivere e svolgere le loro funzioni vitali una volta ricoperte da una maschera che la natura non ha previsto? Per rispondere a questo quesito abbiamo intrapreso una serie di esperimenti su cellule molto robuste e nello stesso tempo molto facili da reperire: le cellule di lievito. È stato proprio il comune panetto di lievito a permetterci di iniziare questa affascinante sfida verso la costruzione di una nanofabbrica che lavori per noi. Gli esperimenti svolti al Max-Planck-Institut per i colloidi e le interfacce di Golm avevano già dimostrato che è possibile ricoprire globuli rossi con particolari polimeri. In quel caso gli eritrociti venivano semplicemente usati come stampi per costruire le nanocapsule e successivamente disciolti con una procedura analoga a quella che abbiamo illustrato nella figura a pagina XX. Abbiamo quindi deciso di utilizzare gli stessi polimeri, usando come primo strato il polimero carico positivamente perché è noto che la parete esterna del lievito ha una leggera carica negativa. Il secondo accorgimento è stato quello di marcare uno degli strati polimerici con una molecola fluorescente, in modo da poter visualizzare la ricopertura della cellula con un microscopio ottico a fluorescenza. (Le cellule di lievito hanno dimensioni di qualche micrometro e quindi sono ben visibili al microscopio ottico.)

Il primo obiettivo era dunque raggiunto: era possibile ricoprire le cellule con strati polimerici. Obiettivo non scontato perché, a differenza dei globuli rossi, le cellule di lievito possiedono, oltre alla normale membrana plasmatica che ricopre tutte le cellule, una parete esterna, analoga a quella dei batteri. Tuttavia, perché questo nuovo ibrido cellula-polimero sia foriero di speranze e risultati concreti, è necessario che siano soddisfatti tre requisiti fondamentali, relativi all'integrità e alla funzionalità delle cellule così trattate. Innanzitutto occorre che la procedura utilizzata per la ricopertura non distrugga le strutture interne della cellula, e in particolare il DNA, né porti a uno svuotamento della cellula stessa. Una sonda fluorescente, il DAPI, ci ha permesso di vedere che in effetti il DNA dei mitocondri e del nucleo della cellula era integro all'interno del guscio verde corrispondente alla ricopertura polimerica. Il secondo requisito pone una condizione più stringente: le cellule ricoperte, sottoposte a una compressione meccanica e a un cambiamento delle condizioni di interfaccia con l'ambiente esterno, devono essere in grado di svolgere le funzioni vitali connesse al metabolismo. Condizione necessaria perché ciò avvenga è che siano attivi i mitocondri, cioè le centrali energetiche della cellula. Qual è il significato di questo requisito? Con un paragone un po' improprio, ma che ci permette di capire il senso della domanda, possiamo paragonare la situazione a quella di un uomo chiuso in un sacco, che può sopravvivere solo se il tessuto permette il passaggio dell'aria. Ma in che tipo di sacco abbiamo nascosto le nostre cellule? Anche in questo caso ci viene in aiuto una sonda fluorescente, il DASPMI, che legandosi ai mitocondri emette fluorescenza solo se essi svolgono una normale funzione respiratoria. L'immagine in cui si osserva anche la fluorescenza dei mitocondri indica chiaramente che il sacco è sufficientemente poroso da permettere alla cellula di «respirare».

Il terzo requisito è legato a una domanda in un certo senso più inquietante. Queste cellule di lievito sono ancora in grado di duplicarsi? Perché lo possano fare occorre fornire loro opportuni metaboliti, altrimenti rimangono in uno stato quiescente, che è quello utilizzato per gli esperimenti fin qui descritti. Abbiamo quindi incubato per un'intera notte il nostro sistema ibrido cellula-polimero, utilizzando lo stesso brodo di coltura che permette la replicazione delle cellule non trattate. Con soddisfazione, la mattina seguente abbiamo osservato che la cellula è in grado di replicarsi e di esercitare forze che «bucano» in qualche punto la scorza polimerica che la ricopre. Nel nostro esperimento gli strati del rivestimento erano quattro e ancora non sappiamo quanti strati la cellula possa attraversare: la risposta ce la daranno gli esperimenti che abbiamo in programma e che dovrebbero fornirci una valutazione delle forze e delle strategie biologiche coinvolte nella replicazione cellulare all'interno delle nanocapsule.

LA CELLULA O I FARMACI, mascherandosi opportunamente, possono affrontare condizioni ostili nell'organismo o superare incolumi barriere altrimenti invalicabili.

Prospettive future

Le maschere si sono sempre rivelate utili ogniqualvolta si sia dovuto accedere ad ambienti ostili: il palombaro utilizza uno scafandro per scendere nelle profondità marine, l'astronauta può uscire dalla sua navicella se dotato di una sofisticata tuta spaziale, l'antico guerriero indossava l'armatura metallica prima di affrontare la battaglia. È ovvio che ogni situazione richiede una maschera specifica. La cellula, o i farmaci stessi, mascherandosi opportunamente possono affrontare condizioni ostili o superare incolumi barriere altrimenti invalicabili. Attualmente i laboratori scientifici di diversi paesi sono impegnati nell'ambizioso progetto di realizzare nanocapsule che, viaggiando come navicelle microscopiche nel flusso sanguigno del corpo umano, siano in grado di colpire selettivamente cellule tumorali o di agire come nanosensori di condizioni ambientali avverse.

In tale scenario, gli obiettivi a breve e a lungo termine del nostro gruppo sono i seguenti: far produrre alle cellule incapsulate ben determinate proteine, eventualmente con azione enzimatica; modificare opportunamente la parete polimerica delle nanocapsule in modo da dirigerle verso bersagli specifici e indurle poi a rilasciare il loro contenuto in modo mirato. Ci riusciremo? La sfida è stimolante.

BIBLIOGRAFIA

DECHER G., *Fuzzy Nanoassemblies: Toward Layered Polymeric Multicomposites*, in «Science», 277, pp. 1232-1237, 1997.

DONATH E. e altri, *Novel Hollow Polymer Shells by Colloid-Template Assembly of Polyelectrolytes*, in «Angewandte Chemie International Edition», 37, n. 16, pp. 2201-2205, 1998.

DIASPRO A. e altri, *Single Living Cell Encapsulation in Nano-organized Polyelectrolyte Shells*, in «Langmuir», 18, n. 13, pp. 5047-5050, 2002.

La catena di Sant'Antonio & l'evoluzione delle specie

Uno studio di queste (fastidiose) sequele di lettere mostra come si possa ricostruire l'albero genealogico di qualunque cosa evolva nel tempo, dai genomi alle lingue, ai compiti in classe copiati

di Charles H. Bennett, Ming Li e Bin Ma

Abbiamo per le mani qualcosa come 33 versioni di lettere che fanno parte di una stessa catena di Sant'Antonio. Raccolte tra il 1980 e il 1995, quando presso il grande pubblico erano diffuse le fotocopiatrici ma non l'e-mail, queste lettere sono passate di mano in mano, mutando ed evolvendo. La loro lunghezza è in media di 2000 caratteri, all'incirca come quella di un gene. Come un potente virus, la lettera minaccia di morte il ricevente, e lo induce a diffonderla tra amici e conoscenti (una versione di catena di Sant'Antonio ha raggiunto milioni di persone). Come un carattere ereditario, promette vantaggi a chi la riceve e a coloro che la riceveranno dopo di lui. Non diversamente dai genomi, le lettere di una catena subiscono una selezione naturale, e a volte alcune parti di esse possono essere trasferite tra diverse «specie» esistenti. A differenza del DNA, tuttavia, queste lettere sono facili da leggere. E così, la loro leggibilità le rende particolarmente adatte all'insegnamento scolastico della filogenesi (o storia evoluzionistica), senza le complicazioni della biologia molecolare.

Queste lettere sono un fenomeno sociale affascinante, ma sono interessanti anche perché offrono un banco di prova per gli algoritmi utilizzati in biologia molecolare al fine di ricostruire alberi filogenetici dai genomi degli organismi esistenti. Se questi algoritmi sono affidabili, devono poter produrre buoni risultati anche quando sono applicati alle lettere di una catena di Sant'Antonio. Utilizzando un nuovo algoritmo abbastanza generico da avere una vasta applicabilità a questo tipo di problemi, abbiamo ricostruito la storia evolutiva di 33 lettere (*si veda l'illustrazione a pagina 77*). I metodi standard non funzionano così bene con queste lettere. Sviluppato originariamente per i genomi, il nostro algoritmo è stato anche applicato allo studio delle lingue e utilizzato per rivelare i casi di copiatura nei compiti scolastici: qualunque cosa sia costituita da una sequenza di simboli è pane per i suoi denti.

Un virus della mente

Le 33 lettere della catena sono parte di una collezione curiosa. Una volta etichettate arbitrariamente da L1 a L33, è stato possibile evidenziare differenze significative. Vi sono 15 titoli diversi, 23 nomi per un certo «impiegato» e 25 nomi per l'autore della lettera originale. Sono presenti comuni errori d'ortografia, frasi scambiate, aggiunte o mancanti. (Una tipica lettera viene mostrata alla pagina seguente insieme con le sue molte variazioni.) Quasi tutte sono più o meno fotocopie sbiadite di dattiloscritti; ciò induce a supporre che le mutazioni abbiano origine secondo un processo intermittente, in cui una lettera viene fotocopiata per molte generazioni fino a che la sua leggibilità è talmente ridotta che il ricevente successivo decide di ribatterla a macchina, introducendo nuovi errori e variazioni.

Tutte le lettere, tranne tre, erano in copia unica; per L4, L6 e L22, una seconda copia è arrivata entro pochi mesi dalla prima. Oltre alle 33 lettere in lingua inglese, ne abbiamo ricevute (senza includerle nel nostro studio) quattro in francese, una in olandese e una in tedesco, tutte evidentemente con un antenato comune con quelle in inglese.

Per analizzare le lettere, le abbiamo riscritte al computer, interamente in carattere minuscolo, ignorando le informazioni extra come date e note a margine, così come le divisioni del testo in righe e paragrafi. In questo modo, ciascuna lettera diventa un'unica stringa di caratteri.

Prima di applicare il nostro nuovo algoritmo, abbiamo tentato di analizzare le lettere con una procedura chiamata allineamento multiplo, largamente utilizzata per esaminare geni e ricostruire una filogenesi. Questo metodo tenta di mettere in linea quante più sezioni coincidenti possibile. La quantità di passi identici tra qualunque coppia di lettere definisce la loro somiglianza, e da questo dato, tramite un altro algoritmo, si costruisce un albero evolutivo. Sfortunatamente, l'allineamento multiplo trova concordanze solo tra tutto ciò che rimane nello stesso ordine, perciò viene messo in crisi da L12 e L26, in cui l'ordine delle frasi è stato mutato. Per la stessa ragione, si sa che la tecnica funziona all'interno dei singoli geni meglio che nell'intero genoma, in cui tali traslocazioni sono più comuni.

Abbiamo tentato di omettere L12 ed L26 e di effettuare poi un allineamento multiplo con le restanti 31 lettere. Anche con questo insieme troncato, l'albero risultante è sembrato sbagliato, classificando L6, L7 e L13 come lettere strettamente collegate. L'errore è avvenuto perché queste lettere ad albero sono tutte relativamente corte: la quantità di differenze è proporzionalmente piccola. Lo stesso problema può sorgere anche in genetica: il semplice conteggio delle differenze può sovrastimare la somiglianza dei genomi corti e sottostimare quella dei genomi grandi.

Tenuto conto di ciò, abbiamo escogitato una nostra misura di somiglianza per lettere di una catena o di qualunque altro tipo di dati che possono essere immagazzinati in un computer. L'intenzione era di rendere la nostra nuova misura di somiglianza indifferente ai rimescolamenti di minore portata, come le traslocazioni, che rappresentano solo una piccola perdita di somiglianza d'informazioni. Per far fronte alle differenze di lunghezza, volevamo che la nostra misura assegnasse il valore «0» a due file di dati completamente diversi, e il valore «1» a due file identici, indipendentemente dalle loro dimensioni.

La misura naturale del contenuto informativo in un file di dati non è rappresentata dalla sua dimensione bruta espressa in bit, ma piuttosto dalla più piccola dimensione di un file compresso, ottenuto con un programma tipo Zip o StuffIt. Questi programmi sono progettati per risparmiare spazio su disco cercando e riducendo i più comuni tipi di ridondanza (per esempio le frasi ripetute). Si ottiene così un file più piccolo da cui l'originale può essere perfettamente ricostruito quando necessario.

Qualcosa d'interessante accade se si comprimono insieme due file in modo che entrambi possano essere rigenerati dal file compresso. Se i due file non condividono alcuna informazione, il file compresso congiunto sarà grande quanto i due file compressi combinati. Se i due file contengono parte della stessa informazione, questa ripetizione sarà rivelata da un buon programma di compressione, e il file compresso congiunto sarà più piccolo. In questo modo, le dimensioni del file compresso congiunto confrontato con la somma dei singoli file compressi forniscono una misura della somiglianza dei file.

Questa misura non è ancora adatta ai nostri scopi, poiché due file di grandi dimensioni tendono ad avere una somiglianza maggiore di due file piccoli. Per aggirare questo problema, definiamo la nostra «misura di parentela» come la proporzione di informazione condivisa, vale a dire la percentuale per quale la somma dei file compressi separatamente eccede le dimensioni del file compresso in modo congiunto. Ciò rende il

Le catene di Sant'Antonio si rivelano particolarmente adatte per l'insegnamento scolastico **della filogenesi**

range di relazione compreso tra 0 - per i file senza relazione - a 1 (o 100 per cento) per i file identici, indipendentemente dalla lunghezza.

Quale programma di compressione è opportuno usare? Ovviamente, la nostra misura di parentela dipenderà da questa scelta. In linea di principio, vorremmo utilizzare un programma che comprime ogni file alla più piccola dimensione possibile. Lo studio delle misure dell'informazione, definite in termini di questa estrema comprimibilità, costituisce un'elegante branca della teoria dell'informazione nota come teoria dell'informazione algoritmica o complessità di Kolmogorov (dal nome di uno dei suoi fondatori, il matematico russo Andrei N. Kolmogorov). Sfortunatamente, i teorici dell'informazione hanno provato che un programma ideale di compressione necessiterebbe di un tempo praticamente infinito per svolgere il suo compito...

Per i nostri obiettivi, quindi, abbiamo deciso di utilizzare un particolare algoritmo di compressione chiamato GenCompress, creato da Xin Chen dell'Università della California a Santa Barbara. GenCompress è stato progettato per i genomi ma, come vedremo, funziona bene anche sulle lettere di una catena. Dato un insieme di lettere, utilizzando il programma GenCompress calcolare la relazione in ciascuna coppia è un processo diretto e interamente automatico. Il passo successivo, che converte i dati della parentela in un albero evolutivo, è anch'esso in gran parte automatico (esistono molti pacchetti software per questo scopo). Il risultato può essere un semplice diagramma ad albero con lunghezza arbitraria dei rami, che indica semplicemente lo schema quantitativo di discesa, oppure un diagramma più dettagliato, con lunghezza dei rami che rappresenta la relazione in termini quantitativi.

In entrambi i casi, l'intervento umano di maggiore portata è decidere dove mettere la radice dell'albero, che rappresenta l'ipotetico antenato comune a tutte le lettere (o specie). Nelle filogenesi biologiche, la radice indica le specie estinte milioni di

TEMA E VARIAZIONI

Una semplice lettera a catena, indicata con la sigla L11, illustra alcuni modi in cui le lettere collegate sono cambiate quando furono ribattute a macchina (presumibilmente dopo che le fotocopie erano diventate illeggibili). Le variazioni maggiori sono avvenute con nomi familiari e cifre di denaro: errori di questo tipo possono facilmente sfuggire, poiché il mutamento non cambia il significato della lettera.

Questa lettera è stata spedita per portarti fortuna. L'originale è nel New England.

Ha fatto il giro del mondo nove volte. Ora la fortuna è toccata a te. Avrai fortuna entro quattro giorni dal ricevimento della lettera, purché nel frattempo tu l'abbia rispedita.

Questo non è uno scherzo. La lettera porta fortuna. Non spedire denaro. Spedisci copie alle persone che tu ritieni abbiano bisogno di fortuna. Non spedire denaro, perché il destino non ha prezzo. Non tenere questa lettera. Deve ripartire entro 96 ore.

Un ufficiale della R.A.F. ha ricevuto 470 dollari.

Joe Elliot ha vinto 40.000 dollari e li ha persi perché ha interrotto la catena.

Intanto nelle Filippine Gene Welch ha perso la moglie 51 giorni dopo aver ricevuto la lettera. Tuttavia, prima della sua morte ha ricevuto 7.755.000 dollari e li ha persi perché non è riuscito a rispedire la lettera.

Per favore, spedisci venti copie e guarda che cosa succede in quattro giorni. La catena viene dal Venezuela ed è stata scritta da Saul Anthony DeGroot, un missionario del Sud Africa.
Devi fare venti copie e spedirle. Dopo qualche giorno avrai una sorpresa.
Ciò è vero, anche se non sei superstizioso.

Presta attenzione a ciò che segue. Constantine Diaz ha ricevuto la catena nel 1953. Chiese alla sua segretaria di fare 20 copie e di rispedirle. Pochi giorni dopo vinse alla lotteria due milioni di dollari. Carlo Daditt impiegato in un ufficio, ricevette la lettera e dimenticò di spedirla entro 96 ore. Perse il lavoro. In seguito ritrovò la lettera, spedì 20 copie e trovò un lavoro migliore. Dylan Fairchild ricevette la lettera, non credendole la buttò via. Nove giorni dopo morì.

Nel 1987 la lettera giunse molto sbiadita e appena leggibile a una giovane donna in California. Si ripromise di ribatterla a macchina e di spedirla, ma anche lei la mise da parte. Ebbe vari problemi, comprese alcune riparazioni molto costose alla sua automobile. La lettera non lasciò le sue mani entro 96 ore. Infine riscrisse la lettera come promesso ed ebbe una nuova auto.

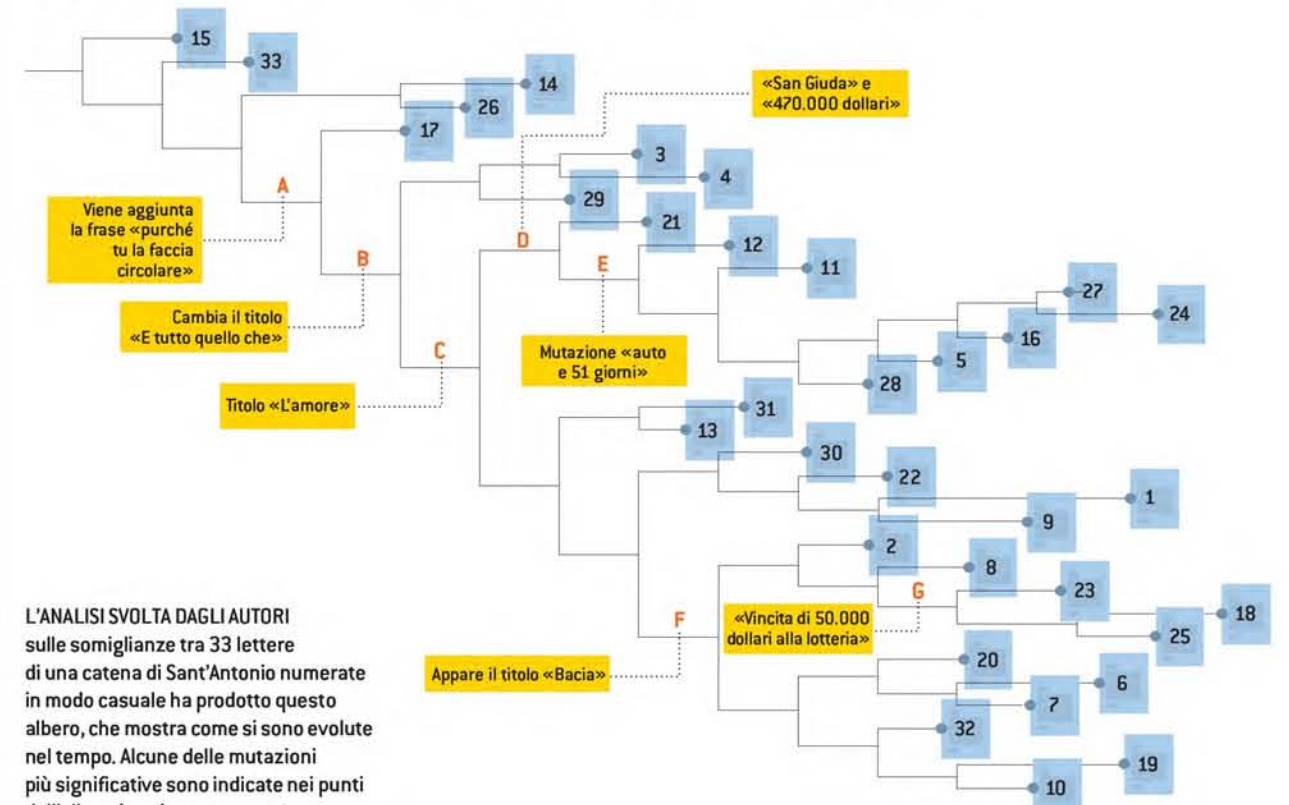
Ricorda di non spedire denaro. Non ignorarla. Funziona.

COME EVOLVONO LE LETTERE

L'albero evolutivo delle catene di lettere, dedotto dalla misura di «parentela», mostra diverse caratteristiche interessanti. (Altre caratteristiche sono discusse nel testo.) Al punto A è stata adottata la frase «purché tu la faccia circolare». Al punto B, si è aggiunto un nuovo titolo: «E tutto quello che chiederete con fede nella preghiera, lo otterrete». Al punto C, il titolo è mutato ulteriormente in «Con l'amore tutto è possibile». Sempre al punto C, i «Paesi Bassi» («Netherland» nell'originale) si sono mutati in «New England» e «General Welch» è diventato «Gene Welch». La frase «Per nessuna ragione deve essere interrotta» è scomparsa.

Al punto F, il titolo è mutato in «Bacia qualcuno che ami quando ricevi questa lettera e sii felice». Dopo aver concluso la nostra analisi, abbiamo trovato uno studio molto interessante e completo su più di 460 lettere a catena di diversi tipi del matematico Daniel W. VanArsdale. Il suo studio solleva la questione: quale titolo fu il primo: «Bacia» o «L'amore»? Da parte nostra, non abbiamo ancora applicato il nostro algoritmo alle molte lettere a catena di questa collezione ma, a giudicare dalla nostra filogenesi, il titolo «L'amore» fu il primo. Questa conclusione è supportata dalla quantità di denaro ricevuta da Gene Welch: in tutte le lettere «Bacia» (eccetto quelle mutate in G) ha ricevuto 7755 dollari, mentre nel gruppo «L'amore» ne ha ricevuti 7.755.000. Nel gruppo prima di C, la cifra era 775.000. La sequenza di mutazioni 775.000 dollari → 7.755.000 dollari → 7755 dollari → è più parsimoniosa di 775.000 dollari → 7755 dollari → 7.755.000 dollari.

Al punto D, 70.000 dollari sono diventati 470.000, e compare «San Giuda». Al di fuori di questo gruppo non compaiono né 470.000 dollari né San Giuda. Al punto E, compaiono due alterazioni interessanti in concorrenza: una è la storia dell'auto della donna californiana, e poi cambia da 6 a 51 giorni il tempo trascorso tra il ricevimento della lettera da parte di Gene Welch e la morte di sua moglie. Ciò è costante in tutte le lettere nel gruppo radicato in E; eccetto che per L28, che richiede una spiegazione *ad hoc*. La mutazione «auto e 51» non compare mai al di fuori del gruppo E.

L28 presenta un trasferimento orizzontale, cioè il passaggio di informazioni da un «organismo» a un altro, oltre a una semplice eredità. Nel gruppo radicato in D, ogni lettera fa ricevere a ciascun ufficiale della RAF 470.000 dollari o 470, eccetto per L28, in cui la cifra è 70.000. L28 ha anche Gen. Welch, che altrimenti compare nelle lettere prima del punto C. Tutte le lettere del gruppo D, eccetto L21, riportano la storia dell'auto e tutte tranne L21 e L28 hanno la mutazione dei «51 giorni». Sembra incredibile assumere che in L28 siano comparsi «70.000 dollari» e «Gen. Welch» per mutazione indipendente da altre versioni di queste mutazioni presenti altrove. Si potrebbe porre la mutazione «auto e 51» prima di «470.000 e San Giuda», ma poi L21 deve subire una genesi poco plausibile: o deve perdere la storia dell'auto e rimutare «51 giorni» in «6 giorni» o potrebbero essere comparsi indipendentemente «470.000 dollari» e «San Giuda». Apparentemente, qualcuno aveva davanti due versioni della lettera mentre componeva L28 (o L21) e ha introdotto un gene estraneo da una lettera prima di C.

L'ANALISI SVOLTA DAGLI AUTORI sulle somiglianze tra 33 lettere di una catena di Sant'Antonio numerate in modo casuale ha prodotto questo albero, che mostra come si sono evolute nel tempo. Alcune delle mutazioni più significative sono indicate nei punti dell'albero in cui sono avvenute.

Sara Chen

L'accumularsi delle mutazioni in un genoma mitocondriale (o in una catena di Sant'Antonio) **agisce come un orologio**

anni fa, così non dovrebbe essere collegata troppo strettamente ad alcuno dei rami che rappresentano organismi attuali. Nel nostro studio, le lettere di una catena sono state raccolte nell'arco di 15 anni, e alcune di esse sono state datate verso l'inizio di questo periodo, così abbiamo scelto di porre la radice vicino a una di queste (L15). Sfortunatamente, la maggior parte delle lettere è stata raccolta senza registrare il timbro postale della data di ricevimento, e ciò dipende dal fatto che questo progetto è cominciato come un hobby e solo più tardi è diventato una ricerca scientifica.

La filogenesi di San Giuda

L'albero evolutivo ricostruito per le lettere di una catena appare come una filogenesi quasi perfetta, nel senso che i documenti che condividono una caratteristica sono sempre raggruppati. Dopo aver costruito l'albero, eravamo in grado di utilizzarlo per formulare numerose ipotesi su come le lettere sono evolute.

Per prima cosa, riteniamo che nella nostra filogenesi le lettere più vecchie siano quelle prima del punto C (*si veda la figura alla pagina precedente*). La maggiore prova di ciò è che il nome «Carlo Daddit» e il titolo della lettera hanno avuto il maggior numero di mutazioni in questo gruppo di lettere. Ci aspettiamo che tali errori siano più comuni nelle lettere più vecchie, poiché a quel tempo le fotocopiatrici erano meno disponibili e le lettere ribattute più frequentemente. Inoltre, tra le 14 lettere datate, le due che ricorrono nel gruppo pre-C (L4 e L15) sono le più vecchie. Le lettere più vecchie sono tutte titolate con preghiere religiose, vengono dai Paesi Bassi e contengono la frase «Per nessuna ragione deve essere interrotta la catena».

In secondo luogo, è possibile osservare un effetto familiare alla biologia molecolare: differenti parti del genoma hanno tassi di mutazione abbastanza diversi. In biologia, i siti attivi degli enzimi mutano poco nel complesso, mentre parti lontane dal sito attivo subiscono di continuo spostamenti casuali. In modo simile, con lettere a catena le parti richieste per la «vitalità» non mutano affatto, ma parti più arbitrarie come i contrattempi che dovrebbero capitare a quelli che non prolungano la catena, mutano di più. Mutano in massimo grado, invece, le parti con un minore significato intrinseco per consentire di trovare gli errori: per esempio, nomi poco familiari come «Gem Walsh» e «Carlo Craduit».

Un altro fenomeno biologico che compare nelle lettere di una catena è la comparsa di mutazioni parallele di compensazione: due mutazioni, che sarebbero individualmente dannose, devono avvenire insieme per essere neutre o vantaggiose. Escludendo L12 e L 26, in cui nessuno muore, tutte le lettere prima del punto C (eccetto quelle vicine a L29) recitano:

> il generale Welsh (o una variante)
> ha perso la vita (*life*)... tuttavia, prima della
> sua (*his*, di lui) morte...

D'altra parte, le lettere dopo il punto C riportano:

> Gene Welch (o una variante) ha perso la
> Moglie (*wife*)... tuttavia prima della
> sua (*her*) morte...

GLI AUTORI

CHARLES H. BENNETT, MING LI e BIN MA hanno cominciato il loro lavoro sulla catena di Sant'Antonio nel corso di un'escursione sulle montagne di Hong Kong durante la quale Bennett ha menzionato la sua collezione a Li. Bennett lavora presso il centro di ricerca dell'IBM di Yorktown Heights, nello Stato di New York. Si è concentrato sulla fisica dell'elaborazione dell'informazione e ha collaborato a ricerche sul teletrasporto. Ming Li si occupa di bioinformatica e di complessità di Kolmogorov e insegna *computer science* all'Università di Waterloo, in Ontario. Ma si occupa di bioinformatica e di progettazione di algoritmi come docente di computer science presso la University of Western Ontario.

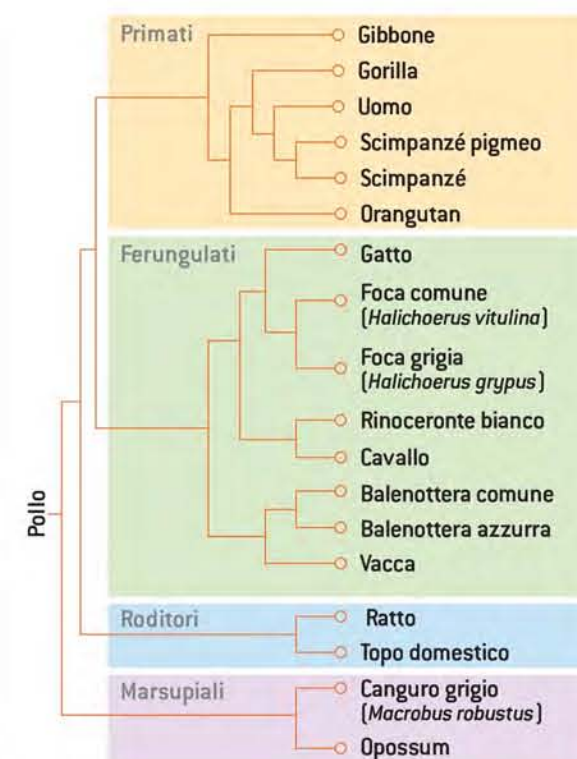
Per mantenere un senso, «his» (di lui) è stato mutato in «her» (di lei) (*si veda la finestra alla pagina precedente per altre osservazioni di questo tipo*).

Mammiferi e plagio

Oltre ad analizzare le lettere a catena, la nostra misura di parentela è stata utilizzata in diversi ambiti. Nella stessa bioinformatica, l'abbiamo utilizzata per analizzare i genomi mitocondriali di 18 mammiferi. I mitocondri sono organelli di produzione di energia all'interno delle cellule, i cui geni sono ereditati soltanto dalla madre (allo stesso modo, una lettera di una catena eredita da un singolo «genitore»). Poiché non avviene alcun rimescolamento di geni materni e paterni, l'accumulazione di mutazioni nel genoma mitocondriale funziona come un orologio che misura quando l'antenato di un organismo si è separato dalle specie parenti.

Spesso i metodi tradizionali applicati a differenti geni mitocondriali forniscono alberi evolutivi in conflitto, senza contare che molti di essi, a differenza della nostra nuova misura, non possono essere applicati con successo a un intero genoma a causa di problemi come la traslocazione. Per esempio, utilizzando i metodi tradizionali, circa sei geni mitocondriali implicherebbero che i primati, e quindi anche noi esseri umani, siano più vicini ai roditori che ai ferungulati, un gruppo diverso che comprende bovini, cavalli, balene, gatti e cani. Un'altra decina di geni implica che primati e ferungulati siano la coppia di ordini più strettamente collegata, una visione generalmente ritenuta corretta in base a molte altre linee di evidenza, come i geni mitocondriali e le registrazioni fossili. Quando il nostro metodo è applicato a interi genomi mitocondriali, produce questo secondo albero evolutivo senza avere necessità alcuna di un aggiustamento *ad hoc* per risolvere ambiguità o contraddizioni (*si veda la finestra qui a fianco*).

PARENTELE TRA MAMMIFERI

Diversi problemi possono essere analizzati con la «misura di parentela» messa a punto dagli autori. Applicata ai genomi mitocondriali, essa produce la filogenesi dei mammiferi raffigurata qui sotto. Si noti come i primati siano imparentati ai ferungulati più strettamente che ai roditori, una circostanza che si sa essere vera. Questo grado di parentela non risulta determinato chiaramente quando si utilizzano tecniche tradizionali. L'albero è ancorato a un gruppo esterno tramite il pollo. Ovviamente i mammiferi non si sono evoluti dal pollo, ma con esso i mammiferi avrebbero avuto un comune antenato appartenente ai rettili.

BIBLIOGRAFIA

LI MING e VITANYI PAUL M., *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer Verlag, 1997 (seconda edizione).

LI MING, CHEN XIN, BADGER JONATHAN H., KWONG SAM, KEARNEY PAUL e ZHANG HAOYONG, *An Information-Based Sequence Distance and Its Application to Whole Mitochondrial Genome Phylogeny*, in «Bioinformatics», 17, n. 2, pp. 149-154, febbraio 2001.

BENEDETTO DARIO, CAGLIOTI EMANUELE e LORETO VITTORIO, *Language Trees and Zipping*, in «Physical Review Letters», 88, n. 4, pp. 048702-2-048702-4, 28 gennaio 2002.

VANARSDALE DANIEL W., *Chain Letter Evolution*, www.silcom.com/~barnowl/chain-letter/evolution.html

Le lettere utilizzate per questo articolo e altri dati si trovano al sito: www.math.uwaterloo.ca/~mli/chain.html

Una discussione dei metodi di ricostruzione filogenetica si trova alla pagina: helix.biology.mcmaster.ca/721/outline2/node47.html

La complessità di Kolmogorov è discussa alla pagina www.wikipedia.org/wiki/kolmogorov_complexity

Portando l'arte della ricostruzione filogenetica ai suoi estremi, Dario Benedetto, Emanuele Caglioti e Vittorio Loreto, dell'Università «La Sapienza» di Roma, hanno tentato di ricostruire la filogenesi delle lingue umane non analizzando la letteratura o la storia di una lingua ma semplicemente applicando un metodo simile al nostro a 52 traduzioni della *Dichiarazione universale dei diritti dell'uomo*. Il risultato è stato sorprendentemente buono, considerando il limitato corpo di prove su cui è basato. Un errore evidente è stata la classificazione dell'inglese come lingua romanza, strettamente imparentata al francese, mentre dal punto di vista storico l'inglese si sviluppò dal ceppo germanico. Questo errore sorge a causa della quantità di termini francesi che l'inglese ha acquisito dopo la conquista normanna (un esempio di trasferimento parallelo).

Un'altra applicazione del nostro metodo di misura è stata la scoperta di una copiatura di compiti scolastici. Il caso riguardava un corso di programmazione di computer: due elaborati risultarono insolitamente simili, anche se il docente non aveva alcun indizio palese che uno dei due studenti avesse copiato. Ai fini della ricerca, i due studenti sono stati contattati ed è stata promessa loro l'impunità in cambio di un onesto resoconto su come erano andate effettivamente le cose. I due avevano discusso tra loro su come affrontare il problema enunciato nell'esame, ma non avevano lavorato insieme oltre questo livello. Se questi sono veramente i fatti, il nostro algoritmo di distanza ha rivelato le sottili somiglianze generate dalla loro discussione!

La natura automatica della nostra procedura presenta pro e contro. Da una parte, fornisce risposte oggettive, libere dalla necessità di valutare varie linee di evidenza (come il DNA o le registrazioni fossili) o di tenere in considerazione le parti del genoma che mutano più in fretta. Dall'altra, non trae beneficio dalle informazioni che potrebbero provenire da questi dati aggiuntivi. Tutti i metodi di inferenza filogenetica sono imperfetti, e a volte portano a una filogenesi che differisce in modo sostanziale da quella che ha avuto luogo storicamente. Come gli storici e i paleontologi, i biologi che si occupano di evoluzione molecolare sono arrivati ad accettare che la piena verità sul passato non potrà mai essere ricostruita, per quante linee di evidenza si riescano a considerare. Ciò è vero in particolar modo per le specie estinte. Molte di esse non saranno mai conosciute, poiché non hanno lasciato né fossili né discendenti. Allo stesso modo, molte lingue sono scomparse senza lasciar traccia, anche nel secolo scorso.

Nel regno delle lettere a catena come quelle che abbiamo analizzato, è certo che molte di esse si sono «estinte» quando i riceventi hanno interrotto la catena. Come le opere di Sofocle andate perdute, i testi di queste lettere non potranno mai essere recuperati, e la loro esistenza può soltanto essere ipotizzata sulla base di strane circostanze che non hanno spiegazioni razionali, come accade per l'aumento di disoccupati o del costo delle riparazioni meccaniche in California.

Il computer che si ripara da solo

di Armando Fox e David Patterson

Le prestazioni dei computer sono migliorate di 10.000 volte negli ultimi vent'anni: per fare qualcosa che nel 1983 richiedeva un anno di calcolo, oggi è sufficiente meno di un'ora, e un personal computer di quell'epoca non può reggere il confronto con la potenza di calcolo di un odierno organizer tascabile. Per questi miglioramenti, però, c'è un prezzo da pagare. Man mano che la complessità dei sistemi digitali cresce, il loro funzionamento diventa fragile e inaffidabile. Gli errori legati ai calcolatori sono ormai fin troppo comuni: i personal computer vanno in crash o si bloccano frequentemente, i siti Internet vanno spesso off line. I continui aggiornamenti del software, con l'intento di aumentare le prestazioni, possono rendere le cose peggiori di prima. A parte gli inconvenienti, la situazione è anche parecchio costosa: le spese annuali di manutenzione, riparazioni e lavori superano di molto il costo totale dell'hardware e del software, sia per i singoli individui sia per le aziende.

Accettando l'inevitabilità degli errori di sistema, i computer orientati al recupero tornano in funzione più velocemente

Slim Films

Il nostro gruppo di ricerca alla Stanford University e all'Università della California a Berkeley ha intrapreso una nuova strada, accettando il fatto che gli errori di sistema e quelli degli operatori umani siano inevitabili. Anziché tentare di eliminare i crash dei computer - un compito probabilmente impossibile - il nostro gruppo si concentra sulla progettazione di sistemi che si riprendono in fretta quando si verifica un inconveniente. Chiamiamo il nostro approccio «calcolo orientato al recupero» (Recovery-Oriented Computing, o ROC).

Abbiamo scelto di concentrare i nostri sforzi sul miglioramento del software dei siti Internet. Questo tipo altamente dinamico di sistema di calcolo deve evolvere ed espandersi rapidamente in risposta alle domande dei clienti e alle pressioni del mercato, servendo nel contempo utenti che si attendono un accesso istantaneo in qualsiasi momento. Si consideri per esempio il motore di ricerca Google, che è passato in pochi anni dalla localizzazione di centinaia di milioni di pagine Web di testo in inglese a 3 miliardi di pagine in più di 20 lingue e in una dozzina di formati, oltre alle immagini. Contemporaneamente, il numero delle ricerche effettuate da Google è salito da 150.000 a 150 milioni: il sito è ora 1.000 volte più occupato di quanto fosse all'inizio.

Per la necessità di aggiornare continuamente l'hardware e il software dei siti Internet, molte delle tecniche di ingegneria cui si ricorreva in passato per contribuire a mantenere affidabile il sistema sono troppo costose. Per questo motivo, riteniamo che il software di Internet rappresenti un buon banco di prova per le nostre idee e forse un modello per altri sistemi di calcolo, comprese macchine desktop e portatili. Se i principi del ROC sono in grado di aiutare gli animali più grandi nella giungla del calcolo, probabilmente faranno lo stesso anche per le specie più piccole.

Seguendo una collaudata strategia ingegneristica - adottata per la prima volta nel XIX secolo all'epoca dei ponti ferroviari a travatura di ghisa - il nostro primo passo è stato quello di capire che cosa potevamo imparare dagli errori precedenti. Nel caso specifico ci siamo chiesti: perché i sistemi Internet si guastano, e che cosa si può fare, in proposito? Siamo rimasti sorpresi, quando abbiamo scoperto che gli errori dell'operatore sono una delle principali cause dei problemi di sistema. I tentativi tradizionali di migliorare l'affidabilità di software e hardware hanno quasi sempre trascurato la possibilità di un errore umano, eppure gli errori degli utenti sono responsabili in molti casi di una quantità di *downtime* (tempo di fermo) superiore a quella dovuta a qualsiasi altra causa (*si veda la finestra nella pagina a fronte*).

È possibile che gli operatori debbano fronteggiare queste difficoltà perché i progettisti dei computer e i programmatori hanno spesso sacrificato la facilità d'uso alla ricerca di migliori prestazioni. I software di archiviazione e i database, per esempio, richiedono a volte uno staff ben addestrato di amministratori a tempo pieno per essere gestiti. Poiché l'hardware e il software sono diventati sempre più economici con il tempo, spesso gli stipendi degli operatori sono ironicamente la spesa maggiore per mantenere in funzione i siti Internet più complessi.

Tenendo in mente queste considerazioni, il nostro team sta esplorando quattro principi guida per la costruzione di sistemi sicuri di calcolo ROC. Il primo riguarda un rapido recupero: poiché i problemi continueranno a verificarsi, i tecnici dovrebbero progettare sistemi in grado di riprendersi velocemente. In secondo luogo, le aziende dovrebbero fornire agli utenti strumenti migliori con cui identificare le fonti di errore all'interno di sistemi con molti componenti. Terzo, i programmatori dovrebbero costruire sistemi che dispongano di una funzione *undo* o «annulla» (simile a quella comune nei programmi di *word processing*), in modo che gli operatori possano correggere i propri errori. Infine, gli esperti di informatica dovrebbero sviluppare la possibilità di inserire errori di prova; questi permetterebbero di valutare il comportamento del sistema e contribuirebbero ad addestrare l'operatore. Stiamo pensando di rendere disponibili gratuitamente alla comunità informatica tutte le applicazioni software ispirate al ROC che abbiamo scritto.

Per favorire l'adozione del nostro approccio, incoraggiamo inoltre lo sviluppo e la distribuzione di programmi di *benchmark*, o di valutazione delle prestazioni, che testino la velocità di recupero di un sistema di calcolo. Questi software misurerebbero i progressi dell'industria dei computer per aumentare l'affidabilità, e incoraggerebbero le aziende a lavorare per raggiungere questo obiettivo.

Un ritorno rapido

Molti utenti effettuano abitualmente un *reboot* del proprio computer, o per prevenzione, perché la macchina si sta comportando in modo strano, o per reazione, perché c'è stato un crash o un blocco del sistema. Il reboot è utile anche per i computer più grandi, in quanto permette di ricominciare da zero e di eliminare tutta una classe di cosiddetti «errori transitori», ovvero problemi che appaiono a intermittenza.

Sfortunatamente, la maggior parte dei sistemi impiega un tempo molto lungo a riavviarsi e, peggio ancora, può perdere dati durante il processo. Siamo convinti che sarebbe meglio se i progettisti studiassero sistemi in grado di riavviarsi più dolcemente. Se fossimo in grado di guardare all'interno di un computer, vedremmo molti diversi software in funzione allo stesso tempo. Mentre si fa shopping on line, per esempio, alcuni moduli consentono ai clienti di guardare fra la merce disponibile; altri permettono di aggiungere gli oggetti a un «carrello della spesa»; e altri ancora consentono di completare l'acquisto. Un ulteriore livello di programmazione, infine, fa da coreografia a tutte queste funzioni, producendo complessivamente l'esperienza dell'uso del sito e assicurandosi che ogni linea di codice esegua il suo lavoro al momento del bisogno.

Spesso è solo uno di questi moduli a incontrare difficoltà, ma quando l'utente riavvia il computer tutto il software in funzione si arresta immediatamente. Se ciascuna delle sue componenti separate potesse essere riavviata in modo indipendente, non ci sarebbe però bisogno di resettare l'intero insieme. E se un difetto colpisce solo poche parti del sistema, riavviare solamente questi elementi isolati potrebbe risolvere il problema. Se poi questo dovesse rivelarsi inefficace, basterebbe reinizializzare un set di componenti più grande. Il segreto è di essere in grado di riavviare un modulo senza confondere accidentalmente gli altri e far credere loro che qualcosa stia andando storto, il che è quasi come estrarre un piatto in fondo a una pila senza far cadere gli altri, un'impresa difficile ma non impossibile.

IN SINTESI

- Nonostante l'indiscussa potenza degli attuali computer rispetto a quelli di 10 o 20 anni fa, gli utenti continuano a essere tormentati dall'ostinata inaffidabilità dei loro sistemi. Le pratiche di design del calcolo orientato al recupero (ROC) potrebbero fare molto per risolvere questa situazione.
- I principi del ROC - che comprendono tentativi di sviluppare capacità di recupero rapido, utility per localizzere velocemente gli errori, funzioni di «annulla» per neutralizzare gli sbagli degli operatori umani e tecniche di inserimento di errori per valutare l'abilità del sistema di tornare in funzione - potrebbero forse eliminare gran parte della frustrazione provocata dall'uso dei computer.
- Programmi di benchmark per valutare la velocità con cui i sistemi tornano pienamente in servizio incoraggerebbero inoltre gli sforzi delle industrie per migliorare l'affidabilità dei sistemi.

Per ottenere UN'ALTA AFFIDABILITÀ: assicurarsi che vi siano meno interruzioni o far tornare on line i sistemi più velocemente

George Candea e James Cutler, due studenti di Stanford del nostro gruppo, si sono dedicati a sviluppare questa tecnica di reboot indipendente, che chiamiamo micro-rebooting. Le precedenti esperienze di Cutler comprendono la costruzione di sistemi economici di ricevitori di terra per catturare dati provenienti da satelliti, assemblati a partire da PC fuori commercio, radio a basso costo e software sperimentale. Di solito nelle stazioni terrestri gli errori sono comuni, e se un operatore umano non è disponibile per riattivare manualmente le attrezzature, il segnale del satellite può essere perso, e con esso tutti i dati di quell'orbita.

L'anno scorso Candea e Cutler hanno sperimentato il micro-rebooting sul software di una stazione terrestre. Insieme con altri collaboratori hanno modificato ogni modulo del software della stazione ricevente affinché non fosse «preso dal panico» quando altri componenti venivano reinizializzati. Per prima cosa gli studenti hanno consultato gli operatori umani per apprendere quali fossero le cause di errore più frequenti, e poi hanno fatto esperimenti per determinare quale set di componenti avrebbe dovuto essere reinizializzato per curare quei problemi specifici. Sono riusciti ad automatizzare il processo di recupero per un'ampia gamma di problemi ricorrenti, abbattendo il tempo medio di ripristino da 10 a 2 minuti, abbastanza da permettere a una stazione terrestre che perde qualche colpo di riacquisire il segnale del satellite e di continuare a raccogliere i dati dell'ultima orbita.

In termini di affidabilità, la percentuale di tempo in cui un sistema computerizzato funziona correttamente è definita la sua «disponibilità», ed è tipicamente misurata in unità chiamate «nove». Un sistema che funziona correttamente per il 99,999 per cento del tempo, per esempio, ha una disponibilità di «cinque nove», corrispondenti a un downtime di circa 2 ore nell'arco di 25 anni di operazioni. In confronto, un normale sistema ben mantenuto è disponibile solo dal 99 al 99,9 per cento del tempo («da due a tre nove»). Passare da 2 a 5 nove permetterebbe di risparmiare quasi 90 ore di downtime all'anno, cosa apprezzabile quando il downtime ha un costo molto elevato (*si veda la finestra qui a fianco*). Esistono due metodi per ottenere un'elevata affidabilità: assicurarsi che avvengano meno interruzioni o, se questo non è possibile, permettere ai sistemi di tornare on line più velocemente.

Per gli operatori della stazione terrestre satellitare, un ritorno in funzione cinque volte più rapido aveva molto più valore di un aumento di cinque volte del lasso di tempo fra gli errori (miglior affidabilità), anche se i due valori costituivano un identico miglioramento della disponibilità. Riteniamo che per numerosi sistemi di calcolo valga la stessa cosa.

Anche se modificare manualmente il software della stazione terrestre ha richiesto molti sforzi, Candea e uno di noi (Fox) stanno ora studiando se la tecnica può essere applicata in modo automatico anche ai siti Web programmati con Java 2 Enterprise Edition, un popolare pacchetto di sviluppo per il software di Internet.

Oggi il modo più comune per far fronte agli errori dei siti Web è quello di riavviare il sistema, il che può richiedere dai 10 secondi (se si effettua il reboot della sola applicazione) a un minuto (se si riavvia l'intera macchina). Secondo i nostri primi risultati, effettuare un micro-reboot dei soli componenti necessari richiede meno di un secondo. Anziché leggere un messaggio di errore, un utente sperimenterebbe un ritardo di 3 secondi seguito dalla ripresa del normale servizio.

I computer potrebbero diventare 10.000 VOLTE PIÙ VELOCI ma non più affidabili delle macchine oggi in commercio

Individuare i problemi

Se rimediare a errori noti o probabili è una cosa, tutt'altra sfida è scoprire quelli inattesi. Gli operatori di sistema potrebbero aver bisogno di assistenza per rintracciare i problemi più rapidamente: questo è il secondo dei nostri principi del ROC.

Quando si costruisce un sistema di calcolo tradizionale ad alta affidabilità, i programmatori cominciano con una descrizione completa di tutti gli elementi hardware e software. Proseguono poi con un schema di analisi degli errori accuratamente costruito che indica tutti i possibili guasti del sistema, così da poterli prevenire o, se si verificano, correggerli. A differenza dei sistemi single-source, i servizi Internet sono eterogenei, e usano componenti che provengono da fornitori diversi. Inoltre, spesso questi moduli cambiano rapidamente man mano che il servizio si evolve. Gli errori possono nascere da interazioni inaspettate fra i componenti, più che da difetti in una singola parte del software. Quando si verifica uno di questi problemi dinamici, l'utente del Web che in quel momento sta accedendo al servizio può ricevere un messaggio di errore.

Per contribuire ad analizzare questi complessi malfunzionamenti tre studenti - Emre Kiciman ed Eugene Fratkin di Stanford e Mike Chen di Berkeley - hanno creato PinPoint, un programma basato sul ROC che tenta di determinare di quali componenti è la colpa.

Ogni volta che qualcuno naviga in un sito Web attrezzato con PinPoint, il programma identifica i componenti di software che contribuiscono a fornire il servizio a quell'utente. Se una particolare richiesta di accesso fallisce - per esempio, se l'utente riceve un messaggio di errore dal sito - PinPoint registra il fatto. Col passare del tempo, usando tecniche standard di analisi dei dati, l'applicazione analizza l'insieme dei componenti che erano attivi in occasione delle richieste fallite e di quelle eseguite. In questo modo PinPoint può scoprire quali componenti sono sospettati di aver causato la maggior parte degli errori. Le informazioni accumulate dal codice di analisi degli errori rallentano il sistema al massimo del 10 per cento. A differenza della soluzione tradizionale, che richiede una pianificazione elaborata a ogni modifica del pacchetto di codici, PinPoint funziona con qualsiasi combinazione di componenti software.

Cancellare gli errori

Forse la sfida più grande per aumentare l'affidabilità di un sistema consiste nell'assicurarsi un margine di sicurezza contro gli errori casuali di input da parte dell'operatore; questo concetto è alla base del nostro terzo principio del ROC, che riguarda il comando «annulla». I primi word processor non prevedevano questa possibilità, il che rendeva frustrante, se non spaventoso, il loro impiego. Bastava un solo errore di sostituzione globale del testo per distruggere un intero file. La funzione «annulla», che consente agli utenti di poter cancellare qualsiasi comando, ha eliminato l'ansia di commettere un errore.

Gli operatori dei grandi sistemi di calcolo odierni non hanno la stessa possibilità. Quando sono state poste le fondamenta della tecnologia informatica, nessuno ha pensato che fosse importante essere in grado di cancellare gli errori. Questo perché l'implementazione di una funzione «annulla» richiede molto lavoro, consuma una quantità significativa di spazio e probabilmente rallenta in qualche misura i sistemi.

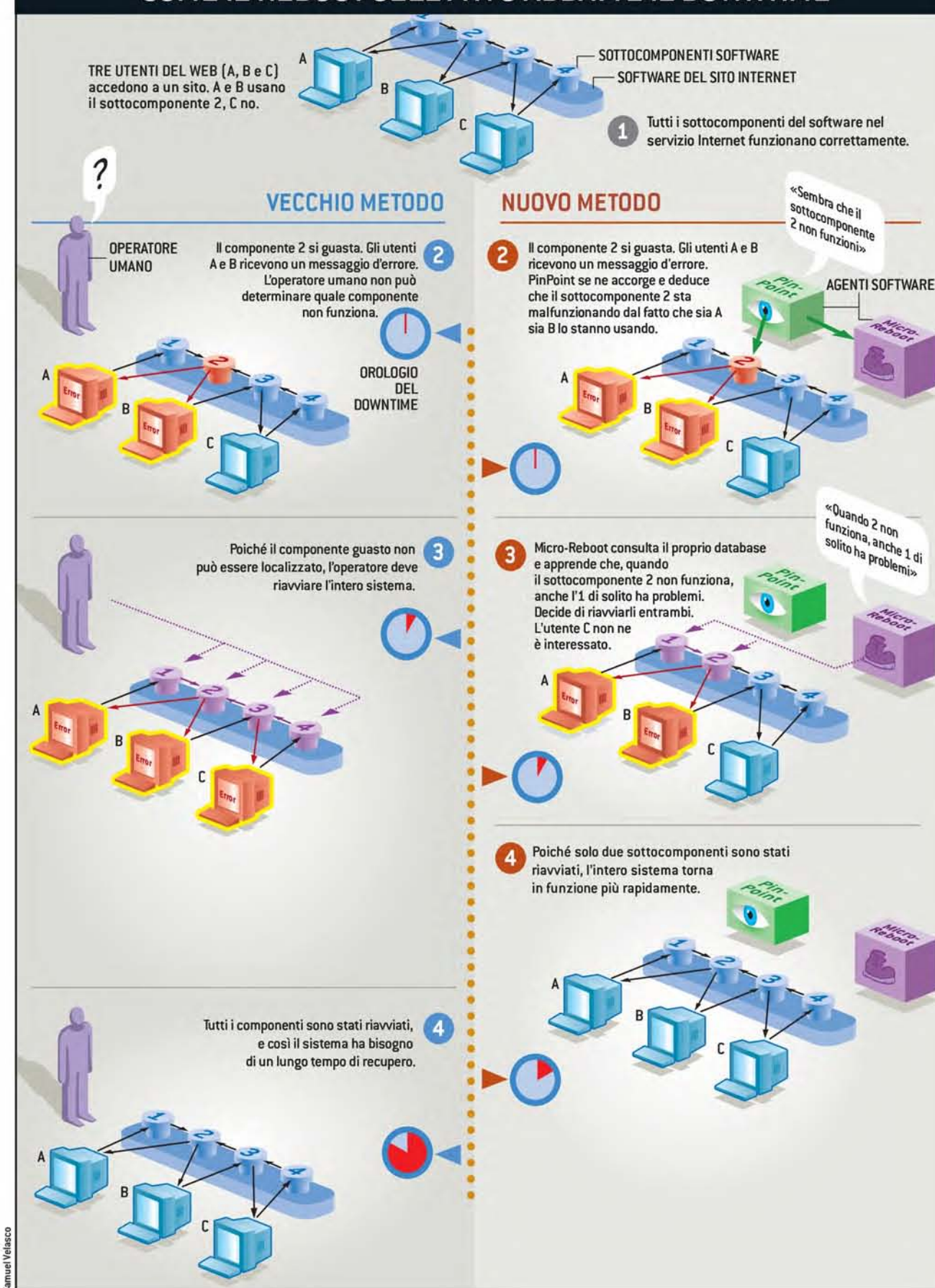
Per sperimentare un migliore approccio, il nostro gruppo sta lavorando su un comando di questo tipo per i sistemi di posta elettronica, in particolare per la gestione dei server dove vengono memorizzati i messaggi. Lo studente di Berkeley Aaron Brown e uno di noi (Patterson) hanno recentemente completato il prototipo di un sistema di e-mail dotato di una utility «annulla» per l'operatore. Al momento è in fase di prova [*si veda la finestra a pagina 87*].

Supponiamo che un server convenzionale di gestione delle e-mail venga infettato da un virus. L'operatore del sistema dovrà disinfettare il server, un lavoro faticoso. Il nostro sistema, invece, registrerebbe in modo automatico tutte le attività del server, compresi i messaggi cancellati. Se il sistema venisse infettato, l'operatore potrebbe usare il comando di annullamento per «portare indietro l'orologio» fino a prima dell'arrivo del virus. Potrebbe poi scaricare un software in grado di neutralizzare il virus e, infine, «riportare avanti» tutti i messaggi di posta creati dopo l'infezione, restituendo il sistema alla normalità. L'antivirus appena installato filtrerebbe tutto il traffico di e-mail successivo. In questo modo, l'operatore potrebbe evitare il danno senza perdere messaggi importanti. Per prevenire una potenziale confusione fra gli utenti, che potrebbero accorgersi della rimozione di alcune e-mail, il sistema invierebbe un messaggio affermando che alcune comunicazioni sono state cancellate nel tentativo di bloccare la diffusione di un virus.

Introdurre errori di prova

L'ultimo dei nostri principi del ROC consiste nell'idea di utilizzare gli errori a fin di bene. Suggeriamo di mettere periodicamente alla prova il sistema inserendo errori artificiali. Questa pratica permetterebbe di valutare le prestazioni di recupero di un sistema e di scoprire nuovi

GLI AUTORI

ARMANDO FOX e DAVID PATTERSON studiano da molti anni il modo di migliorare l'affidabilità dei sistemi informatici. Fox è professore alla Stanford University dal 1999. In qualità di studente di Ph.D. all'Università della California di Berkeley, ha collaborato con Eric A. Brewer per costruire prototipi degli odierni servizi Internet a cluster e mostrare come possono supportare applicazioni per computer portatili, compreso il primo Web browser grafico per i personal digital assistant. Fox ha anche contribuito alla progettazione di microprocessori alla Intel, e in seguito ha fondato una start-up che costruisce computer portatili. Ha ricevuto le sue altre lauree in ingegneria elettrica e in informatica al Massachusetts Institute of Technology e all'Università dell'Illinois. Patterson ha trascorso l'ultimo quarto di secolo come professore a Berkeley. Ha conseguito il suo dottorato in informatica all'Università della California di Los Angeles. Patterson è noto soprattutto per il suo lavoro sulla semplificazione dell'architettura dei microprocessori, per la costruzione di sistemi digitali di memoria affidabili e per essere co-autore dei classici testi *Computer Architecture: A Quantitative Approach* e *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. Patterson ha scritto per la prima volta su «Scientific American» vent'anni or sono.

LA BATTAGLIA PER L'AFFIDABILITÀ

I sistemi informatici e i loro «organi interni» - microprocessori, applicazioni e reti di comunicazione - stanno diventando sempre più potenti. Ma diventano anche sempre più complessi e perciò più suscettibili agli errori. Man mano che di conseguenza crescono i costi di amministrazione, controllo e downtime, scienziati e ingegneri nell'industria dei computer stanno lavorando per migliorare l'affidabilità e la regolarità dei propri prodotti. Significativamente, molti dei loro sforzi mirano a escludere gli esseri umani (e gli errori che inevitabilmente questi producono).

Preoccupato per i buchi nella sicurezza, gli errori di programmazione e altre debolezze nella sua attuale linea di prodotti, il management della Microsoft ha recentemente preso l'insolita decisione di bloccare per un intero mese lo sviluppo del software, per concentrarsi su quello che chiamano «computing attendibile». La questione dell'affidabilità ha guadagnato importanza, giacché un numero sempre crescente di amministratori adotta il sistema operativo Windows per gestire i propri Web server. Gli sviluppatori dei sistemi operativi alla Microsoft hanno seguito corsi per apprendere tecniche per migliorare la sicurezza e l'affidabilità dei sistemi desktop e stanno ora perfezionando Windows per la prossima versione, chiamata Palladium. I tecnici progettano di identificare i potenziali punti deboli dei prodotti attuali, sviluppando nel frattempo nuove caratteristiche che potenziano le difese contro gli hacker.

Non sono state condotte molte ricerche sui modi di ridurre il costo di gestione di un computer, il prezzo che i proprietari e le aziende pagano per tenere in funzione i loro sistemi. Agli Hewlett-Packard Laboratories e alla IBM Research i programmatori stanno lavorando per abbattere queste spese, aggiungendo nuove capacità o sviluppando prodotti in grado di gestirsi da soli. I responsabili della Hewlett-Packard immaginano un network globale di risorse di calcolo e di immagazzinamento dati in grado di monitorarsi, curarsi e adattarsi da solo senza l'intervento di un operatore. Il progetto di Planetary Computing della HP si concentra sullo sviluppo di centri di calcolo corporativi che possano contenere fino a 50.000 singoli computer da ufficio, una quantità 10 volte superiore a quella delle controparti odierne.

Il progetto sviluppato dalla IBM prende in prestito idee dalla teoria del controllo (l'uso di feedback per stabilizzare sistemi a circolo chiuso) e dalle intelligenze artificiali (mimare o assimilare l'intelligenza umana e la sua capacità di risolvere problemi complessi). Questi concetti aiuteranno a creare centri di calcolo in grado di diagnosticare i problemi in modo autonomo, di modificare le proprie configurazioni per adattarsi a richiesta ai cambiamenti, di riparare se stessi e di difendersi contro gli attacchi degli hacker. In un'analogia con il sistema nervoso autonomo del corpo, il management dell'IBM ha battezzato questo progetto «Autonomic Computing».

Quando i progettisti di altri sistemi ingegneristici hanno scoperto una propensione all'errore da parte degli operatori, hanno spesso tentato di eliminare la necessità di un input umano. Rimuovere gli operatori umani può però rivelarsi un trabocchetto, ben noto come «ironia dell'automazione». Poiché i progettisti di solito possono ridurre ma non eliminare la necessità di intervento umano, questi tentativi finiscono spesso per peggiorare le cose. E questo perché generalmente vengono automatizzati i compiti più facili, lasciando i lavori più difficili alle persone. Questi provvedimenti fanno sì che gli amministratori debbano svolgere compiti difficili, sporadicamente, su sistemi non familiari: una ricetta sicura per gli errori.

Quale sarà la strada verso computer veramente affidabili? Una crescente automazione, che porterà a macchine *hands-off*, oppure un design efficiente combinato con strumenti in grado di migliorare notevolmente la funzionalità e la produttività degli operatori umani? Solo il tempo può dirlo.

Samuel Velasco

modi per renderlo più robusto. Facendo un'analogia in ambito hardware, i progettisti di microprocessori aggiungono regolarmente circuiti per semplificare il collaudo dei chip, anche se questi aumentano la dimensione del chip e non vengono più utilizzati dopo che i microprocessori escono dalla fabbrica. I costruttori ritengono che ne valga la pena, in quanto questi circuiti permettono di abbassare i costi per assicurarsi che il chip completato funzioni come previsto. Una parte di questi benefici deriva dal fatto che i circuiti di prova consentono ai progettisti di inserire «errori» artificialmente per verificare come il chip li riveli e si riprenda correttamente.

Il nostro gruppo propone una strategia equivalente per il software dei sistemi di calcolo. Per esempio, quando gli operatori ricorrono alla strategia del reboot selettivo, gli errori di prova aiuterebbero a determinare quali componenti riavviare per controbattere un particolare tipo di problema. Se il problema si è propagato solo a uno o due altri elementi, gli operatori potrebbero limitarsi a riavviare soltanto quelli. Se il difetto ha invece coinvolto un gran numero di elementi, sarebbe forse il caso di riavviare l'intero sistema. Abbiamo iniziato a usare questa tecnica per studiare la propagazione degli errori nei siti Internet costruiti con Java 2 Enterprise Edition.

Un'altra versione di questo software potrebbe permettere ai potenziali acquirenti di valutare come un particolare sistema informatico gestisce gli errori: un programma di benchmark (un software di valutazione delle prestazioni) potrebbe guidare le loro scelte nell'acquisto. Sviluppata dagli studenti di Berkeley Pete Broadwell, Naveen Sastry e Jonathan Traupman, l'applicazione *Fig* valuta la capacità dei programmi di far fronte in modo corretto a errori inaspettati nella libreria standard di C, una parte del sistema operativo usato da quasi tutti i software. *Fig* sta per «Fault Injection in *glibc*», introduzione di errori in *glibc* (una versione della libreria standard di C usata da numerosi programmatori).

L'inserimento di errori permetterebbe ai programmatori di computer di mettere alla prova anche i propri meccanismi di riparazione, cosa altrimenti difficile da fare. *Fig* consentirebbe agli operatori di allenarsi nella diagnosi e nella riparazione dei guasti, magari su un piccolo sistema sperimentale anziché su quello reale. Il programma è stato usato diverse volte, ed è disponibile gratuitamente sul nostro sito Internet dedicato al ROC (citato in bibliografia).

RIPORTARE INDIETRO L'OROLOGIO FINO AI PROBLEMI

Valutare il recupero

Almeno da quando il PC è diventato un «elettrodomestico» di larga diffusione, la storia dell'industria dei computer ci mostra l'importanza di poter misurare i progressi tecnici e di pubblicizzarli. Quando le aziende, con molti anni di ritardo, hanno adottato programmi di benchmark standard per confrontare le prestazioni delle macchine, i clienti hanno finalmente potuto riconoscere chiaramente i meriti relativi di ciascun prodotto. Le società che erano rimaste indietro nella tecnologia sono state costrette a spendere di più nella progettazione, e in seguito hanno potuto valutare l'effetto delle proprie innovazioni usando test di misurazione standard. I dati risultanti dai test hanno provocato un continuo miglioramento delle prestazioni a cascata.

Concentrandosi sulla valutazione del tempo di recupero, Brown e il suo compagno di studi a Berkeley David Oppenheimer, insieme con Patterson, stanno lavorando per ricreare questo tipo di competizione nel campo dell'affidabilità dei sistemi informatici. Alla fine, i prodotti che dimostreranno di essere più veloci a tornare in funzione dopo un crash di sistema saranno quelli che venderanno di più. Riteniamo che sia importante sviluppare un pacchetto di test che comprenda i guasti più comuni nei sistemi reali, compresi gli errori di tutti i giorni causati dagli esseri umani, dal software e dall'hardware. I potenziali clienti avrebbero l'opportunità di inserire questi errori nei sistemi e poi osservare il tempo di recupero. È noto, peraltro, che le campagne pubblicitarie dei computer oggi sono più propense a citare la disponibilità (percentuale di downtime) del sistema, molto più difficile da misurare, anziché il tempo di recupero.

Quando gli scienziati e i progettisti concentrano i propri sforzi su qualcosa, in genere riescono a ottenere un progresso incredibile in un tempo relativamente breve. La crescita fulminea, negli ultimi trent'anni, delle prestazioni e dell'efficienza economica dei computer lo dimostra. Se l'industria continuerà a farsi trascinare alla cieca dalla corrente, tra altri vent'anni i computer potrebbero diventare altre 10.000 volte più veloci di quelli attuali, ma continuerebbero a non essere più affidabili delle macchine di oggi. Facendosi invece ispirare da strumenti di software per migliorare l'affidabilità e per valutare le prestazioni, un giorno l'informatica potrebbe diventare affidabile come gli utenti si attendono.

BIBLIOGRAFIA

PETROSKI H., *To Engineer Is Human: The Role of Failure in Successful Design*. Vintage Books, 1992.

BROOKS FREDERICK P., *The Mythical Man-Month: Essays on Software Engineering*. Seconda edizione, Addison-Wesley, 1995.

REASON JAMES, *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate Publishing Company, 1997.

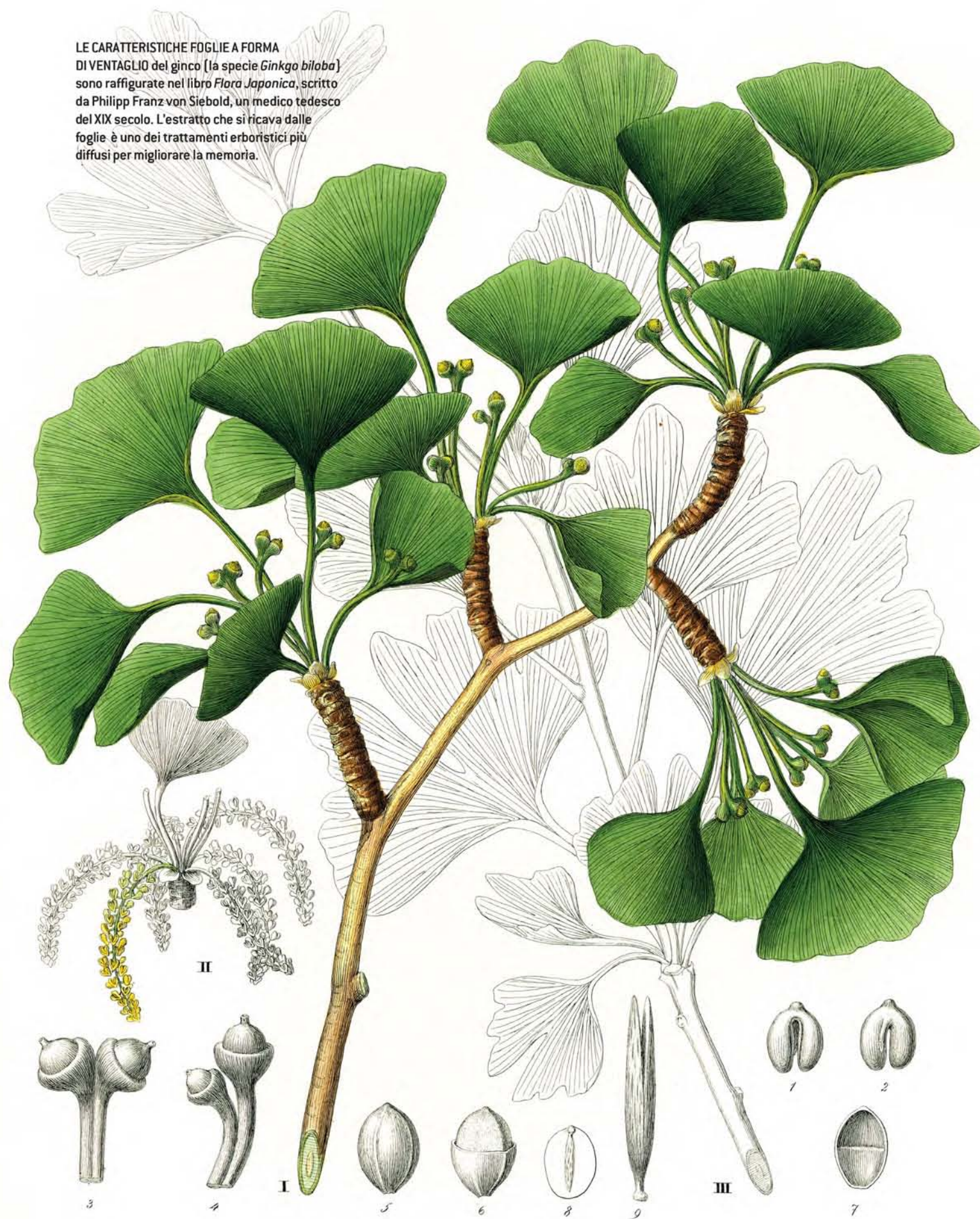
Autonomic Computing. IBM Research, 2001. Disponibile a: www.research.ibm.com/autonomic/manifesto

Building a Secure Platform for Trustworthy Computing. Microsoft, dicembre 2002. Disponibile a: www.microsoft.com/security/whitepapers/secure_platform.asp

Sito Web di Planetary Computing, presso i laboratori Hewlett Packard: www.hpl.hp.com/org/issl/current_research_themes.htm

Sito Web di Recovery Oriented Computing, presso University of California at Berkeley e Stanford University: http://roc.cs.berkeley.edu

PAPADIMITRIOU CHRISTOS, *Turing*, MIT Press (in corso di stampa).

LE CARATTERISTICHE FOGLIE A FORMA DI VENTAGLIO del ginco (la specie *Ginkgo biloba*) sono raffigurate nel libro *Flora Japonica*, scritto da Philipp Franz von Siebold, un medico tedesco del XIX secolo. L'estratto che si ricava dalle foglie è uno dei trattamenti erboristici più diffusi per migliorare la memoria.

Ginkgo biloba: tutta la verità

Il popolare integratore a base di questa pianta può migliorare leggermente le capacità mnemoniche. Tuttavia è possibile ottenere lo stesso effetto anche mangiando una tavoletta di cioccolato

di Paul E. Gold, Larry Cahill e Gary L. Wenk

L'albero del ginco (*Ginkgo biloba*) è straordinario per numerose ragioni. Sebbene sia originario dell'Estremo Oriente, lo si può trovare nei parchi e lungo i viali cittadini di tutto il mondo; può raggiungere un'altezza di 40 metri e vivere per più di 1000 anni. Alcuni fossili di ginco sono stati datati a 250 milioni di anni fa, il che lo pone tra i cosiddetti «fossili viventi». Oggi, comunque, la principale ragione che ha reso popolare il ginco è l'estratto che si ottiene dalle sue foglie a forma di ventaglio. Nella medicina tradizionale cinese si possono trovare riferimenti molto antichi all'uso dell'estratto di questa pianta, che oggi rappresenta forse il trattamento erboristico più usato per migliorare memoria, capacità di apprendimento, attenzione, umore e altro ancora.

L'estratto di ginco è particolarmente popolare in Europa: di recente, in Germania ne è stato ufficialmente approvato l'uso per curare la demenza. Proprio in questo periodo, negli Stati Uniti, il National Institute on Aging sta finanziando una sperimentazione clinica per valutare l'efficacia dell'estratto di *Ginkgo biloba* nel trattamento della malattia di Alzheimer. Tuttavia, siamo certi che l'estratto di ginco possa davvero migliorare le funzioni cognitive? Le informazioni sulla maggior parte degli integratori alimentari si basano di gran lunga più su miti che su scoperte scientifiche, ed è quindi legittimo che venga richiesta maggiore attenzione nei loro confronti. Anche se i prodotti non provocano problemi di natura clinica, possono infatti essere costosi e impedire che i pazienti si rivolgano a cure più efficaci. Nel tentativo di colmare le lacune che ancora possediamo, abbiamo perciò riesaminato le prove sperimentali che depongono sia a favore sia contro l'utilità dell'estratto di *Ginkgo biloba* nel migliorare le funzioni cerebrali.

Da *Flora Japonica*, di Siebold e Zuccarini, Leida 1835/42, volume conservato nel National Herbarium of the Netherlands, Università di Leida; Getty Images (*qui sopra*)

La dose tipica di ginco, quella che viene usata in molti degli esperimenti descritti nel presente articolo, è pari a 120 milligrammi di estratto secco somministrati per bocca in due o tre volte. L'estratto contiene diversi flavonoidi, un'ampia famiglia di prodotti vegetali naturali caratterizzati da una struttura chimica specifica, contenente una serie di anelli benzenici. L'estratto di ginco contiene anche alcuni biflavonoidi, un gruppo di composti affini, e due diversi tipi di terpeni, una classe di sostanze chimiche presenti in natura, fra cui ci sono anche i principi attivi propri dell'erba gatta (*Nepeta cataria*) e della marijuana.

Finora, decine di ricercatori hanno analizzato gli effetti cognitivi dell'estratto di *Ginkgo* sugli esseri umani, ma molti degli articoli che descrivono le loro ricerche non sono stati pubblicati su riviste in lingua inglese o a larga diffusione e ciò rende difficile verificare i risultati. La grande maggioranza degli studi ha riguardato soggetti che mostravano un danno cognitivo ridotto o moderato, inquadrabile come uno stadio iniziale di Alzheimer. La maggior parte degli esperimenti che dimostrano un miglioramento delle capacità cognitive nei pazienti affetti da Alzheimer ha impiegato un estratto standard noto con la sigla EGb 761.

Di solito, i ricercatori che controllano gli effetti dell'estratto di ginco si basano prevalentemente su test di apprendimento e memoria, trascurando altri aspetti come attenzione, motivazione e ansietà. Per di più, siccome la maggior parte dei ricercatori ha sottoposto a test soggetti che avevano fatto un uso prolungato dell'estratto di ginco (tipicamente diversi mesi), diventa difficile identificare quali siano state le capacità cognitive interessate. Per esempio, i punteggi più elevati totalizzati nei test di memoria e apprendimento potrebbero essere una conseguenza del fatto che i soggetti che avevano fatto uso di estratto di ginco prestavano maggior attenzione alle istruzioni iniziali. Per ottenere più dati specifici sugli effetti di questa pianta, i ricercatori dovrebbero sottoporre i soggetti ai test sia prima, sia dopo l'assunzione dell'estratto.

A causa dell'estrema variabilità nelle condizioni sperimentali e nel numero dei soggetti coinvolti nella sperimentazione, è utile limitare l'analisi solo alle indagini più rigorose. Nel 1998, Barry S. Oken della Oregon Health Sciences University assieme ai suoi colleghi ha preso in considerazione più di 50 studi che coinvolgevano soggetti affetti da un danno mentale, e ne ha selezionati quattro in cui le variabili considerate risultavano omogenee. Fra esse: una diagnosi sufficientemente precisa di Alzheimer, l'impiego di un estratto di ginco standard e una pianificazione sperimentale che prevedeva la somministrazione in doppio-cieco con presenza di controllo (si chiama doppio cieco il test in cui né i soggetti coinvolti, né gli sperimentatori sanno, fino alla fine, chi fra i pazienti riceve l'estratto e chi il placebo). Ognuno di questi studi ha dimostrato che i malati di Alzheimer cui veniva somministrato il ginco eseguivano diversi test cognitivi con risultati migliori rispetto ai pazienti che ricevevano il placebo. I miglioramenti erano evidenti nei test standardizzati in cui si misuravano l'attenzione, la memoria a breve termine e la velocità di reazione del paziente, mentre il livello medio di miglioramento che derivava dal trattamento col ginco variava dal 10 al 20 per cento.

Oken e i suoi colleghi hanno riferito che l'effetto del ginco era paragonabile a quello del donepezil, che attualmente rappresenta il farmaco d'elezione usato per l'Alzheimer. Il donepezil aumenta l'attività cerebrale inibendo la degradazione dell'acetilcolina, un neurotrasmettitore cerebrale che trasmette i segnali fra certi tipi di neuroni. Nonostante queste scoperte apparentemente incoraggianti, però, un altro trial recente, di dimensioni consistenti e ben strutturato sull'EGb 761 (sponsorizzato dal suo produttore, la Dr. Willmar Schwabe Pharmaceuticals di Karlsruhe, in Germania), che ha coinvolto pazienti affetti da una demenza di grado leggero o moderato, ha riferito che non si verificava «alcun effetto significativo sistematico e clinico del ginco» in nessuno dei test cognitivi impiegati.

Una domanda critica è se il trattamento a base di ginco, negli studi che dimostrano effetti positivi, abbia migliorato davvero le capacità cognitive nei pazienti con Alzheimer, o piuttosto se non abbia semplicemente rallentato il loro peggioramento. Una ricerca condotta nel 1997 da Pierre L. Le Bars del New York Institute for Medical Research ha fornito due risposte diverse a questa domanda. In questo studio, che faceva parte dei quattro analizzati da Oken, i risultati variavano in base al test cognitivo impiegato. Quando venivano misurate utilizzando l'Alzheimer's Disease Assessment Scale Cognitive Subscale, le prestazioni dei pazienti trattati col placebo peggioravano lentamente nel corso di un anno, mentre quelle dei pazienti trattati col ginco rimanevano stabili. Tuttavia, in base a un secondo test - il Geriatric Evaluation by Relative's Rating Instrument - i soggetti trattati col ginco mostravano un miglioramento quasi equivalente al peggioramento cui erano soggetti i pazienti trattati col placebo.

Per di più, almeno uno studio ha riferito la presenza di effetti positivi su soggetti con disturbi mentali, che si sono manifestati dopo un unico trattamento a base di ginco. Hervé Allain dell'Università dell'Haute Bretagne di Rennes, in Francia, ha somministrato una dose abbastanza consistente di ginco – 320 o 600 milligrammi – a un ridotto gruppo di anziani con modesti deficit mnemonici dovuti all'età. Un'ora dopo il trattamento, Allain ha testato la memoria dei soggetti mostrando loro in rapida successione brevi liste di parole o disegni, e chiedendo quindi ai pazienti di ricordare le liste subito dopo: in seguito all'assunzione del ginco, la capacità individuale di ricordare il materiale presentato rapidamente aumentava in modo significativo. Questa scoperta accresce la possibilità che siano le azioni biologiche a breve termine, anziché quelle a lungo termine, a fornire le basi per quelli che sono gli effetti riferiti del ginco a carico delle capacità cognitive.

Bisogna sottolineare che questa sostanza si è rivelata anche capace di pregiudicare lo svolgimento dei test. Per esempio, in uno studio con pochi soggetti che ha coinvolto persone anziane affette da un danno mnemonico debole o moderato, Gurcharan S. Rai del Whittington Hospital di Londra assieme al suo gruppo ha scoperto che, dopo 24 settimane di trattamento, i pazienti che assumevano il ginco non riuscivano a ricordare alcuni numeri altrettanto bene dei pazienti che prendevano il placebo.

Le informazioni di cui oggi disponiamo sulla maggior parte degli integratori alimentari si basano più sull'aneddotica che su RISULTATI SPERIMENTALI

Monica Stevenson/FoodPix

Un aiuto per le persone sane?

Purtroppo, un numero assai minore di studi ha esaminato gli effetti cognitivi del *Ginkgo biloba* su adulti giovani e sani. In uno studio circoscritto compiuto a metà degli anni ottanta, Ian Hindmarch dell'Università di Leeds in Inghilterra ha sottoposto

GLI EFFETTI DELL'ESTRATTO DI *GINKGO* SUL CERVELLO

I ricercatori non possono affermare con assoluta certezza che l'estratto di *Ginkgo biloba* sia in grado di migliorare le funzioni cognitive, ma hanno scoperto che può agire sul cervello in diversi modi.

AZIONE SUL SISTEMA CARDIOVASCOLARE

- Stimola la vasodilatazione aumentando il flusso ematico nel cervello e diminuendo la pressione sanguigna (forse quindi riduce il rischio di ictus).
- Abbassa i livelli di colesterolo nel sangue (un eccesso di colesterolo è forse collegato alla malattia di Alzheimer).
- Inibisce l'aggregazione piastrinica e la formazione di trombi ematici. Ciò potrebbe ridurre il rischio di ictus cerebrale occlusivo (provocato da un coagulo di sangue che blocca un vaso sanguigno nel cervello), ma aumentare il rischio di un ictus emorragico (causato da un'emorragia cerebrale).

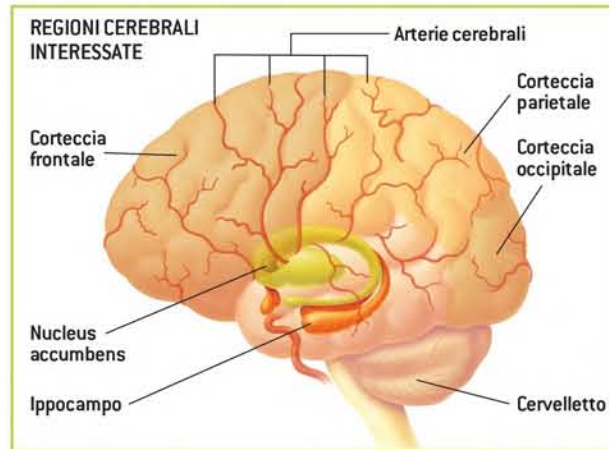
EFFETTO ANTIOSSIDANTE

- Rallenta la formazione di radicali liberi, molecole di ossigeno estremamente reattive che possono danneggiare i neuroni e causare degenerazioni cerebrali collegate all'età.
- Attenua gli effetti dell'ischemia cerebrale – il blocco dell'irrorazione sanguigna in una regione del cervello – inibendo la produzione dei radicali liberi tossici che si formano dopo un episodio ischemico.

UTILIZZO DEL GLUCOSIO

- Favorisce l'assorbimento del glucosio, il carburante principale dell'organismo, nella corteccia frontale e parietale, due regioni del cervello che rivestono notevole importanza nell'elaborazione delle informazioni sensoriali e nella pianificazione di azioni complesse.
- Aumenta l'assorbimento del glucosio nel *nucleus accumbens* e nel cervelletto, le regioni cerebrali coinvolte rispettivamente nella sensazione del piacere e nel controllo del movimento.

AZIONE SUI SISTEMI DI NEUROTRASMETTITORI

- Sembra che aiuti i neuroni della parte anteriore del cervello ad assorbire dal sangue la colina, una sostanza nutritiva che costituisce uno dei componenti dell'acetilcolina, il neurotrasmettitore che trasmette i segnali fra i diversi neuroni cerebrali.
- Rallenta l'attrito dei recettori neuronali che impartiscono gli ordini di risposta alla serotonina, un neurotrasmettitore che riduce lo stress e l'ansia.
- Aumenta il rilascio dell'acido gamma-amminobutirrico (GABA), un altro neurotrasmettitore che può mitigare l'ansia. Il fatto di ridurre lo stress può abbassare il livello ematico di ormoni glicocorticoidi e ciò, a sua volta, esercita un'azione protettiva sull'ippocampo, una struttura cerebrale che riveste importanza per il regolare apprendimento.
- Innalza la produzione di noradrenalina, un altro dei numerosi neurotrasmettitori. La maggiore attivazione del sistema della noradrenalina da parte di alcuni antidepressivi ha dimostrato di essere efficace nel ridurre i sintomi della depressione.

Alice Y. Chen

IN SINTESI

- La nostra analisi della letteratura disponibile ha dimostrato che, in determinate condizioni, l'estratto di ginco aumenta, seppur debolmente, le funzioni cognitive. Gli esperimenti sinora eseguiti sono però troppo pochi e la maggior parte ha coinvolto un numero troppo ridotto di soggetti per poter dare un giudizio definitivo.
- Quello che si sa con certezza è che la somministrazione dell'estratto ha effetti fisiologici positivi sul cervello in quanto migliora la circolazione sanguigna, l'utilizzazione del glucosio da parte della corteccia cerebrale e il rilascio di neurotrasmettitori del sistema nervoso.
- Come risultato, l'estratto di *Ginkgo biloba* si dimostra utile nel migliorare leggermente alcune prestazioni cognitive, come l'attenzione, la concentrazione e la memoria, sia nei roditori sia nell'uomo. Tali vantaggi si possono però ottenere anche con altre sostanze più economiche come il glucosio, che ha dimostrato sul breve termine di aumentare le prestazioni del cervello.

a una serie di test otto soggetti sani (di età compresa fra i 25 e i 40 anni) dopo che questi avevano assunto l'estratto di ginco EGb 761. Hindmarch ha riferito che la dose più elevata sperimentata (600 milligrammi) migliorava lo svolgimento della prova solo nel caso di un test di memoria a breve termine. Più recentemente, due rapporti stilati dal Cognitive Drug Research di Reading, in Inghilterra, hanno fornito prove meno significative a sostegno dell'ipotesi che l'estratto di ginco possa incrementare le funzioni cognitive nei giovani. Un altro studio ha riferito che i soggetti che assumevano una dose di estratto di ginco svolgevano i test per valutare l'attenzione meglio di quanto non facessero i soggetti che assumevano un placebo. Un ulteriore studio ha dimostrato un miglioramento della memoria in soggetti di mezza età (fra i 38 e i 66 anni) trattati con una combinazione di estratto di ginco e ginseng, un altro rimedio erboristico-naturale che viene propagandato come ausilio per la memoria. In ogni caso, non è stato possibile attribuire al solo estratto di ginco gli effetti osservati nell'ultimo studio, perché dosaggi maggiori non hanno mostrato di procurare ulteriori vantaggi, come ci si dovrebbe attendere da parte di una sostanza davvero efficace.

Nel caso della maggior parte dei farmaci, i ricercatori eseguono un gran numero di studi su animali da laboratorio prima di testarli sull'uomo. Simili esperimenti possono risultare utili nel determinare la sicurezza e l'efficacia di una data sostanza chimi-

INTEGRATORI PER IL CERVELLO

di Mark A. McDaniel, Steven F. Maier e Gilles O. Einstein

Gli anziani costituiscono un ambito mercato per i prodotti farmaceutici da banco che vengono presentati dalla pubblicità come «stimolanti cerebrali». In effetti vi sono valide ragioni di natura biochimica per attendersi che alcuni di questi prodotti siano efficaci. Passando in rassegna le ricerche pubblicate, abbiamo trovato studi che dimostravano come alcune di queste sostanze siano chiaramente in grado di incrementare la memoria negli animali da laboratorio e di indurre miglioramenti, a volte anche di notevole portata, nell'uomo. Nondimeno, restano aperte numerose questioni sulle dimensioni del campione utilizzato negli studi, sulla generalità dei risultati ottenuti durante diversi test di memoria e popolazioni, nonché su altri aspetti delle procedure e dei dati. Questi problemi, assieme a una generale carenza di ricerche che dimostrino come sia possibile riprodurre simili risultati, smorzano l'entusiasmo sull'efficacia di questi nutrienti nel bloccare concretamente o nell'invertire la perdita di memoria. Di seguito, pubblichiamo un breve riassunto delle scoperte che riguardano sei tipi di composti non soggetti a prescrizione medica, pubblicizzati come adiuvanti della memoria e come trattamenti per combattere il declino delle capacità mnemoniche collegato all'età.

Chuck Savage/Corbis

LA CAUTELA DEGLI ACQUIRENTI: i ricercatori non hanno trovato prove convincenti del fatto che i supplementi dietetici possano aumentare la memoria.

FOSFATIDILSERINA (PS)

Lipide presente in natura, la PS si è rivelata capace di ridurre numerose conseguenze dell'invecchiamento nei neuroni di ratti e topi anziani e di ripristinare la loro memoria normale nel momento di eseguire svariati compiti. Tuttavia, le ricerche sull'impatto di questa sostanza sull'uomo sono limitate. Nel caso di adulti con un modesto danno cognitivo, la PS ha determinato un aumento modesto nella capacità di ricordare liste di parole. Nel caso di altri test di memoria, non sono stati riferiti così costantemente effetti positivi.

COMPOSTI DELLA COLINA

La fosfatidilcolina, che viene solitamente somministrata sotto forma di lecitina, non si è rivelata efficace nel migliorare la memoria in pazienti affetti da probabile Alzheimer. Ricerche sulla citicolina praticamente non esistono, tuttavia uno studio ha riferito che un ridotto campione di adulti anziani in buona salute mostrava un considerevole miglioramento nel ricordare gli avvenimenti.

PIRACETAM

Sviluppato nel 1967, il piracetam non ha ricevuto l'approvazione dalla Food and Drug Administration statunitense, ma viene venduto in Europa e in Messico con diversi nomi commerciali. Studi eseguiti su animali da laboratorio sembrano indicare che il farmaco può migliorare la trasmissione dei segnali nervosi e l'attività sinaptica, ma anche rallentare il deterioramento delle membrane neuronali che si manifesta con l'avanzare dell'età. Tuttavia, non vi sono segni evidenti di alcun beneficio cognitivo nei pazienti con probabile Alzheimer, o in adulti affetti da deficit di memoria legati all'età.

VINPOCETINA

Alcaloide ottenuto dalla pervinca, la vinpocetina migliora la circolazione sanguigna a livello cerebrale. In tre studi eseguiti su adulti anziani con problemi di memoria associati a ridotta circolazione cerebrale o a qualche malattia che induce demenza, la vinpocetina ha determinato miglioramenti nell'esecuzione di test cognitivi che misuravano l'attenzione, la concentrazione e la memoria.

ACETIL-L-CARNITINA (ALC)

Amminoacido incluso in alcuni farmaci da banco per migliorare le prestazioni del cervello, l'ALC partecipa ai meccanismi cellulari che producono energia, un'attività che si dimostra particolarmente importante per i neuroni. Studi compiuti sugli animali dimostrano che l'ALC fa regredire il declino, collegato alla vecchiaia, del numero di molecole di recettori presenti sulla membrana dei neuroni. Tuttavia, indagini compiute su pazienti con probabile Alzheimer hanno riscontrato solamente vantaggi nominali per l'ALC in un'ampia gamma di test di memoria.

ANTIOSSIDANTI

Gli antiossidanti come le vitamine E e C contribuiscono a neutralizzare i radicali liberi che danneggiano i tessuti, e che si sviluppano principalmente con l'età. Tuttavia, alcuni studi hanno scoperto che la vitamina E non produce significativi benefici a carico della memoria nei pazienti con l'Alzheimer o con la malattia di Parkinson a uno stadio ancora iniziale. La combinazione di vitamina E e C non ha dimostrato di migliorare le prestazioni di studenti liceali in alcun test cognitivo.

Una versione più approfondita di questa finestra, dal titolo Brain-Specific Nutrients: A Memory Cure?, *di Mark A. McDaniel, Steven F. Maier e Gilles O. Einstein è pubblicata in «Psychological Science in the Public Interest» (maggio 2002). (Il testo è disponibile sul sito: www.psychologicalscience.org/journals/pspi/3_1.html). McDaniel è preside del Dipartimento di psicologia dell'Università del New Mexico. Maier è direttore del Centro per le neuroscienze dell'Università del Colorado a Boulder. Einstein è preside del Dipartimento di psicologia alla Furman University.*

ca. Tuttavia, dal momento che l'estratto di ginco non è soggetto ad alcuna particolare normativa, le aziende che lo producono non sono tenute a eseguire test sugli animali. Di conseguenza, disponiamo di un numero relativamente esiguo di resoconti che prendono in esame l'efficacia dell'estratto di ginco nel migliorare l'apprendimento e la memoria negli animali. Probabilmente, il più significativo è uno studio del 1991 compiuto su topi adulti giovani, che erano stati addestrati ad abbassare una leva per ricevere del cibo. I topi trattati coll'estratto di ginco per un periodo da quattro a otto settimane imparavano a svolgere il lavoro che veniva loro richiesto leggermente più in fretta dei topi di controllo. Come nel caso dell'uomo, però, è difficile definire con precisione se l'estratto di ginco aumenti davvero il processo di apprendimento o se, invece, abbia altri effetti che migliorano le prestazioni degli animali in specifici settori. Per esempio, alcuni ricercatori hanno riferito che somministrazioni ripetute riducevano lo stress nei ratti, una condizione che, come è noto, può a sua volta influenzare l'apprendimento e la memoria.

Se davvero l'estratto di ginco fosse in grado di potenziare i processi mentali, quale potrebbe essere il suo meccanismo d'azione? Studi compiuti sull'uomo e sugli animali da laboratorio hanno indicato diversi tipi di effetti biologici che potrebbero contribuire a quello che si presume sia l'effetto di miglioramento delle funzioni cognitive da parte dell'estratto di ginco. Qualsiasi siano i suoi effetti, esso sembra mostrare pochi rischi per la salute, in particolare quando si utilizzano le dosi consigliate che vanno da 120 a 240 milligrammi al giorno. Sono state però osservate alcune complicazioni, fra cui la formazione di ematomi subdurali (coaguli tra le membrane che proteggono il cervello) e problemi gastrointestinali. Come accade per la maggior parte degli estratti vegetali, talvolta l'ingestione di ginco provoca nausea e vomito. Inoltre, alcuni consumatori sperimentano aumento nella salivazione, diminuzione dell'appetito, mal di testa, vertigini ed eritemi cutanei. Dosaggi maggiori possono portare all'ipertensione ortostatica, un disturbo che si manifesta con l'abbassamento della pressione arteriosa dopo repentini cambiamenti della postura. Eppure, l'impressione generale è che l'incidenza di effetti collaterali gravi conseguenti all'utilizzo dell'estratto di ginco sia abbastanza bassa, e che potrebbe essere ulteriormente ridotta se si riuscissero a definire i dosaggi ottimali individuali.

Ma, tornando alla domanda iniziale: l'estratto di ginco aumenta davvero le funzioni cognitive? In generale, gli effetti riportati sono abbastanza modesti. Così come altrettanto ridotto è il numero degli esperimenti, che mostrano livelli qualitativi molto eterogenei fra loro: di conseguenza, le prove a favore anche solo di un beneficio modesto sono davvero deboli. Nell'uomo, l'estratto di ginco può rallentare il declino cognitivo legato alla demenza. È possibile che i principali effetti sulla memoria abbiano una durata relativamente ridotta, ma i dati presenti in letteratura sono così scarsi che, al momento, non è possibile dire una parola definitiva.

L'estratto di *Ginkgo biloba* migliora davvero le capacità cognitive? Le prove a sostegno di un EFFETTO, ANCHE MODESTO, sono deboli

Il nocciolo della questione

Con le prove attualmente disponibili, possiamo dire che l'estratto di *Ginkgo biloba* rappresenti la terapia migliore per incrementare la memoria? Anche altri tipi di integratori hanno mostrato di influenzare le funzioni cognitive nell'uomo e negli animali da laboratorio. Sostanze medicinali come il donepezil possono aumentare notevolmente l'apprendimento e la memoria nei roditori e indurre miglioramenti modesti, ma significativi, nell'uomo. Tuttavia, questi risultati si ottengono anche in altro modo. Per esempio, il fatto di udire un racconto divertente provoca la liberazione nel sangue di adrenalina dal surrene, e ciò aumenta la memoria senza dover assumere alcun farmaco. Un meccanismo col quale l'adrenalina potrebbe aumentare la memoria consiste nella liberazione di glucosio dalle riserve accumulate nel fegato, che viene così reso disponibile per il cervello.

Anche uno zucchero semplice può migliorare la memoria. È noto che il glucosio somministrato per via sistemica (all'uomo mediante ingestione e ai roditori per via endovenosa) aumenta le prestazioni cognitive nei ratti, nei topi e nell'uomo, comprese le persone affette da Alzheimer. Come per la maggior parte dei trattamenti per la memoria, si è visto che solo le dosi intermedie di glucosio aumentano la memoria. Quelle basse risultano inefficaci, mentre quelle alte possono essere controproducenti.

A causa delle differenze nei protocolli sperimentali seguiti per testare gli estratti vegetali è difficile fare confronti diretti sulla loro efficacia. Per esempio, in un test che prevedeva di ricordare una breve storiella, il glucosio aumentava la prestazione negli adulti giovani e nei soggetti più anziani, ma sani, di circa il 30-40 per cento. Nelle persone affette da Alzheimer, il miglioramento in un analogo test di memoria si avvicinava al 100 per cento, mostrando incrementi minori per quanto riguarda altri parametri. Il grado di miglioramento in questi esperimenti è molto superiore rispetto all'incremento del 10-20 per cento rilevato con l'estratto di ginco. Tuttavia, la maggior parte dei test per verificare gli effetti del glucosio ha utilizzato trattamenti a breve termine e confrontato la prestazione prima e dopo, mentre la maggior parte degli esperimenti che valutani l'estratto di ginco ha usato trattamenti a lungo termine e confrontato i soggetti trattati con un gruppo di controllo.

GLI AUTORI

PAUL E. GOLD, LARRY CAHILL e GARY L. WENK si occupano da tempo della possibilità di migliorare le funzioni cerebrali. Gold insegna psicologia e neuroscienze all'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign. Cahill è professore associato di neurobiologia e comportamento, nonché membro del Centro per la neurobiologia dell'apprendimento e della memoria all'Università della California a Irvine. Wenk è professore di psicologia e neurologia all'Università dell'Arizona.

BIBLIOGRAFIA

GOLD PAUL E., CAHILL LARRY e WENK GARY L., *Ginkgo biloba: A Cognitive Enhancer?*, in «Psychological Science in the Public Interest», 3, n. 1, pp. 2-11, maggio 2002.
È consultabile nel sito:
www.psychologicalscience.org/journals/pspi/3_1.html
Maggiori informazioni sugli estratti di *Ginkgo biloba* e altri farmaci naturali si possono trovare nei siti: dietary-supplements.info.nih.gov/ e www.cfsan.fda.gov/~dms/supplmnt.html